

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département de Biologie Végétale et Animale



Mémoire de fin d'études

Réalisé par : **Rabiatou OUEDRAOGO**

Pour obtenir le **diplôme de Master en Écologie et environnement**

Spécialité : Biodiversité et environnement

Thème

**Etude de l'efficacité des variétés de pois chiche
dans la décontamination d'un sol pollué aux
hydrocarbures par phytoremédiation.**

MEMBRES DU JURY :

M^{me} LANDRI G.
M. A. A., UMMTO

Présidente

M^{me} ALI-AHMED S.
M. A. A., UMMTO

Promotrice

M^{me} SADOUDI D.
PROFESSEUR, UMMTO

Examinatrice

Année universitaire : 2021-2022

Remerciements

Je remercie tout d'abord **Allah (Exalté soit-Il)** de m'avoir guidé, donné la santé, le courage et la patience pour mener à terme ce modeste travail ;

Je tiens à remercier également :

Ma promotrice **M^{me} Ali-Ahmed S.** maître assistante et chargé de cours au département de Biologie à l'UMMTO pour son encadrement et ses conseils tout au long de la réalisation de mon mémoire ;

Les membres du jury d'avoir accepté évaluer mon travail ;

Tous mes enseignants (es) sans exception qui ont participé pour une grande part dans ma formation et dans la réalisation de mon mémoire ;

La directrice de laboratoire **M^{me} Sadoudi D.** qui m'a permis d'accéder au laboratoire où j'ai réalisé la partie pratique de mon mémoire ;

L'ingénieure de laboratoire **M^{me} Abrous H.**

L'université Mouloud Mammeri et la résidence universitaire Bastos qui m'ont accueilli, accepté, formé et nourri ;

Ma famille, ma grande sœur **Ouedraogo Z.**, mes amis (es) et toute autre personne qui a contribué et aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicaces

Louange à Allah, Seigneur de l'Univers qui m'a permis de réaliser mon mémoire que je dédie :

A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu, porté dans leurs prières et pour qui, quoique je dise ou fasse, ne pourra point leur remercier et leur exprimer ma gratitude et estime comme il se doit et comme il faut ;

A mes frères et sœurs particulièrement Sékou, Abdou, Zalissa, Habi, Awa et Sanata pour leur soutien moral, affectif et financier ;

A mes demi-frères et demi-sœurs en particulier Rasmané pour son aide financière et morale

A mes beaux-frères et belles-sœurs en particulier Issaka, Mohamed, Rabiadou, Adjara et Djeneba pour leur soutien ;

A mes neveux et nièces particulièrement Ahmed, Abdal, Chikael, Mahamadi, Fadila, Madina, Kalizèta et Faouzia pour leur encouragement et bénédiction ;

A mes grands parents maternels et paternels (qu'Allah leur pardonne et leur fasse miséricorde) ;

A mes tantes et oncles maternels et paternels ;

Au reste de la famille Ouedraogo ;

A mes amis (es) proches et lointains (es) avec lesquels (lles) j'ai partagé mes bons et mauvais moments ;

A mon futur mari in shaa Allah ;

A tous mes enseignants (es) et camarades de l'Ecole Souli, du Collège Sainte-Marie de Ouahigouya et de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Puisse le Tout Miséricordieux et le Très Pardonneur nous guider, nous pardonner, nous faire miséricorde, nous épargner de l'Enfer et nous introduire au Paradis (Al Firdaous). Amin yaa Rabi.



Liste des abréviations

G = graines

BTEX = Benzène – Toluène – Ethylbenzène – Xylènes

CEAEQ = Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec

CNCC = Centre National de Contrôle et Certifications des Semences et des Plants

Cult.Var. = Cultivé par la variété

H = Hauteur

HAM = Hydrocarbures aromatiques monocycliques

HAP = Hydrocarbures aromatiques polycycliques

ICARDA = The International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (Le Centre international de recherche agricole dans les zones arides)

INRA = Institut National de la Recherche Agronomique

INRAA = Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie

ITGC = Institut Techniques des Grandes Cultures

Jr (s) = Jour (s)

L = Longueur

MO = Matière organique

PSEMRVC = Protection, Sauvegarde des Espèces Menacées et des Récoltes, influence des Variables Climatiques

Rx = Répétition

T = Témoin

TO = Tizi-Ouzou

TrVar. = Traité par la variété

Var. = Variété

Liste des figures

Figure	Titre	Page
1	Composition de l'essence et du gazole	7
2	Devenir d'un polluant organique au niveau du sol	10
3	Les différents mécanismes de la phytoremédiation des sols	13
4	Localisation de la station-service de Boukhalfa	16
5	Echantillonnage du sol de la station-service de Boukhalfa	20
6	Schéma du dispositif expérimental	21
7	Schéma du dispositif expérimental de l'expérience sur les vers de terre	23
8	Protocole de dosage de la catalase	24
9	Taux de levée des différentes variétés de pois chiches	28
10	Hauteur moyenne des plants des variétés de pois chiches	29
11	Biomasse aérienne moyenne des variétés de pois chiches	30
12	Biomasse racinaire moyenne des variétés de pois chiches	31
13	Taux de germination des graines de maïs dans les sols traités	32
14	La longueur des racines des graines de maïs dans les sols traités.	33
15	Variation dans le temps du poids des vers de terre dans les différents sols	34
16	Variation dans le temps du taux de mortalité des vers dans les différents sols	35
17	Quantité de CO ₂ dégagé en 7jrs dans les sols traités et non traité.	36
18	Activité de la catalase dans les sols traités et non traité.	37

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
I	Caractéristiques de la variété 'Ghab 05'	17
II	Caractéristiques de la variété Flip 84-92	18
III	Caractéristiques de la variété Ghab 04	18
IV	Caractéristiques de la variété Flip 84-92C (Station I.T.G.C. El-Khroub)	19
V	Caractéristiques de la variété Ghab 04 (ITGC, 2011)	19

Tables des matières

Introduction.....	1
--------------------------	----------

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. Pollution du sol par les hydrocarbures.....	4
I.1. Généralités sur les hydrocarbures.....	4
I.1.1. Définition des hydrocarbures.....	4
I.1.2. Classification des hydrocarbures.....	4
I.1.2.1. Hydrocarbures aliphatiques.....	4
I.1.2.2 Résines et les asphaltènes.....	5
I.1.2.3. Hydrocarbures aromatiques.....	5
I.2. Sources de pollution dans une station service.....	5
I.2.1. Sources naturelles.....	5
I.2.2. Sources anthropiques.....	6
I.3. Sources de pollution dans une station service.....	6
I.3.1. Carburants.....	6
I.3.1.1. Essence.....	6
I.3.1.2. Gazoles.....	7
I.4. Effets de la pollution.....	7
I.4.1. Effets de la pollution sur le sol.....	7
I.4.1.1. Effets de la pollution sur les propriétés physiques du sol.....	7
I.4.1.2. Effets de la pollution sur les propriétés chimiques du sol.....	8
I.4.1.3. Effets de la pollution sur les propriétés biologiques du sol.....	8
I.4.2. Effets de la pollution sur les microorganismes.....	8
I.4.3. Effets de la pollution sur la végétation.....	8
I.5. Devenir du carburant dans le sol.....	8

I.5.1. Volatilisation.....	9
I.5.2 Solubilisation.....	9
I.5.3. Sorption.....	9
I.5.4. Dégradation.....	9
II. Décontamination des sols.....	10
II.1. Mode d'application des techniques de traitement de pollution.....	10
II.1.1. Traitement hors site (ex situ).....	10
II.1.2. Traitement sur site (on site).....	10
II.1.3 Traitement in situ (en place).....	10
II.2. Procédés de traitement des sols pollués.....	10
II.2.1. Procédés physiques.....	11
II.2.2. Procédés chimiques.....	11
II.2.3. Procédés thermiques.....	11
II.2.4. Traitements biologiques.....	11
III. Phytoremédiation.....	11
III.1. Définition de phytoremédiation.....	11
III.2. Principe de la phytoremédiation.....	12
III.3. Stratégies de phytoremédiation.....	12
III.3.1. Phytoextraction (ou phytoaccumulation).....	12
III.3.2. Phytostabilisation.....	12
III.3.3. Phytotransformation (ou phytodégradation).....	12
III.3.4. Rhizodégradation.....	13
III.3.5. Phytovolatilisation.....	13
III.3.6. Limites et avantages de la phytoremédiation.....	13
III.3.6.1. Limites de la phytoremédiation.....	14
III.3.6.2. Avantages de la phytoremédiation.....	14

Chapitre II : Matériels et Méthodes

I. Description et localisation de la station d'étude.....	16
II. Matériels.....	17
II.1. Sol.....	17
II.2. Matériel végétal.....	17
II.2.1. Ain zada (Ghab 05) ou Flip 88-85C.....	17
II.2.2. Makerra ou Flip 01-29C.....	18
II.2.3. El ogbane ou Flip 08-42C.....	18
II.2.4. Béni chograne ou Flip 84-92C.....	18
II.2.5. Oued rhumel (Ghab 04) ou Flip 93-93C.....	19
II.2.6. Maïs.....	19
III. Méthodes.....	20
III.1 Prélèvement du sol.....	20
III.2. Préparation du sol et mise en culture.....	21
III.3. Effets des hydrocarbures sur les plants de pois chiches.....	22
III.3.1. Taux de levée.....	22
III.3.2. Hauteur des plants.....	22
III.3.3. Biomasse aérienne.....	22
III.3.4. Biomasse racinaire.....	22
III.4. Evaluation de l'efficacité de la phytoremédiation.....	22
III.4.1. Test de germination.....	22
III.4.2. Longueur des racines.....	23
III.4.3. Survie et croissance des vers de terre.....	23
III.5. Activité biologique globale.....	23
III.6. Activité enzymatique du sol.....	24
III.7. Analyses statistiques.....	25

Chapitre III : Résultats et Discussions

I. Effets des hydrocarbures sur les plants de pois chiches.....	28
I.1. Taux de levée.....	28
I.2. Hauteur des plants.....	29
I.3. Biomasse aérienne.....	30
I.4. Biomasse racinaire.....	30
II. Evaluation de l'efficacité de la phytoremédiation.....	32
II.1 Test de germination.....	32
II.2. Longueur des racinaires.....	33
II.3. Survie et croissance des vers de terre.....	33
II.3.1. Poids des vers de terre.....	34
II.3.2. Mortalité des vers de terre.....	35
III. Activité biologique globale.....	36
IV. Activité enzymatique du sol.....	37
Conclusion et perspectives.....	40

Résumé

Références bibliographiques

Annexes

Introduction

Les activités anthropiques (industrielles, agricoles ou domestiques) génèrent d'importantes quantités de substances ou de déchets qui présentent énormément de risque pour la santé de l'Homme et qui dégradent aussi son environnement (Girard, 2005).

La production de pétrole a pris une grande ampleur mondiale et ne cesse d'augmenter ; l'Algérie étant l'un des grands pays producteur de gaz et de pétrole (Ramade, 2007). Cette augmentation engendrera une pollution par les hydrocarbures des sites et sols entourant toute installation (Norini, 2007) ; les hydrocarbures étant les polluants les plus dangereux de par leur toxicité, leur récalcitrance, leur persistance dans l'environnement, constituant ainsi un véritable risque pour la santé humaine (Ali Ahmed, 2011).

L'usage des hydrocarbures émet dans les 3 compartiments (air, eau et sol) de substances dangereuses ; or le sol en plus de son rôle de filtre naturel, constitue un support indispensable aux animaux aux végétaux terrestres et à l'Homme, donc toute pollution du sol influera sur ces derniers (Ali Ahmed, 2011).

La présence de plusieurs stations-services sont une source importante de la pollution du sol (Patej, 2002) à cause des opérations de va-et-vient de voitures de toutes sortes, du stockage de produits hydrocarbures dans des cuves souterraines, des déversements de produits à divers endroits de la station. Les stations-services sont donc considérés comme des centrifuges de pollution des sols, notamment à cause du stockage en sous-sol des différents types de carburants (<https://www.degazagecuves.com/travaux-petroliers/depollution-station-service.html>).

Les fuites des carburants des réservoirs de stockage souterrains, les installations de distribution et de diverses opérations industrielles représentent une source importante de contamination du sol et de l'aquifère (Gallego, 2001). Cette pollution est susceptible d'entraîner une bioaccumulation dans la chaîne alimentaire, en présentant des toxicités pour le végétal, l'animal et des risques pour la santé humaine (Soltani, 2004).

La prise de conscience de ces risques conduit à la nécessité d'établir des diagnostics de la pollution et de mettre en œuvre des moyens pour y remédier (Mortet, 2019).

La pollution des sols par les hydrocarbures pose d'importants problèmes d'élimination. Les voies d'élimination physique et chimique ont leurs limites du fait de leur coût ou de leur impact secondaire sur l'environnement. La voie biologique est actuellement en plein essor et suscite de très nombreux travaux de par le monde (Ali Ahmed, 2011). La technique de la phytoremédiation est avantageuse pour diminuer la pression exercée sur l'environnement (Abdelly, 2007) et cette technique semble être une technique particulièrement adaptée aux pays en voie de développement car elle est économique et facile à mettre en œuvre (Koller, 2004).

Les techniques de phytoremédiation exploitent les propriétés des végétaux (Zebiche et Semaani, 2015) et la phytoremédiation est une technologie verte s'avérant être prometteuse au problème posé par la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures. Elle consiste à

évaluer la capacité des plantes à éliminer et/ou atténuer la contamination des sols par les hydrocarbures (Shirdam et *al.*, 2008). C'est une technologie en voie de développement qui a suscité l'intérêt de nombreux laboratoires de recherche à travers le monde. Nous avons plusieurs auteurs qui ont travaillé sur la phytoremédiation au niveau du laboratoire tels que Belaid et Abdi (2021) ; Bourkache et Boussanou (2015) ; Ben Kherfia (2020) et les résultats obtenus semblent satisfaisants.

Pour notre travail nous avons choisi une espèce de légumineuse (5 variétés de pois chiches) pour mener au laboratoire un traitement de sol de la station de Boukhalfa polluée initialement par les hydrocarbures.

C'est dans ce cadre que nous avons procédé à la dépollution des sols contaminés par les hydrocarbures de la station-service de Boukhalfa en utilisant la technique de la phytoremédiation.

Le but de notre travail consiste à un essai de décontamination d'un sol pollué par les hydrocarbures par la phytoremédiation et également à tester et comparer l'efficacité des 05 variétés de pois chiches dans la décontamination d'un sol pollué par les hydrocarbures.

Le présent travail est subdivisé en trois chapitres : le premier chapitre est une synthèse bibliographique consistant en un rappel concernant les généralités sur les hydrocarbures, les procédés de décontamination des sols pollués et la technique de phytoremédiation.

Le deuxième chapitre consiste à présenter la station d'étude ainsi que l'ensemble des matériels, méthodes et protocoles mises en œuvre pour réaliser notre mémoire.

Le troisième chapitre consiste en la présentation des résultats obtenus ainsi que leur discussion.

Nous terminons notre travail par une conclusion et des perspectives.

I. Pollution du sol par les hydrocarbures

La pollution du sol par les hydrocarbures occupe une position particulière due à la toxicité et de l'effet cancérigène de certains d'entre eux ainsi qu'aux quantités importantes susceptibles d'être introduites dans l'environnement. L'origine des pollutions par les hydrocarbures est liée aux activités industrielles, urbaines et également à l'enfouissement et à l'infiltration des produits pétroliers à partir de la surface du sol ou de résidus hydrocarbonés (Bocard, 2006). La pollution par hydrocarbures est due à des rejets, volontaires ou non, de produits pétroliers, et elle relève à la fois de la pollution chimique et organique (Koller, 2009).

I.1. Généralités sur les hydrocarbures

I.1.1. Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques qui ne contiennent que des atomes de carbone (83 à 87%) et d'hydrogène (10 à 14%) (Bocard, 2006) mais ils peuvent aussi contenir de faible quantité d'azote (0,1 à 2%), d'oxygène (0,05 à 6%), de soufre (0,05 à 6%) et de métaux lourds (inférieur à 0,1%) (Speight, 2014). Ils regroupent différents produits pétroliers comme le pétrole brut, le pétrole raffiné, le kérosène, les essences, les gazoles, les lubrifiants, les huiles à moteurs (Lemière et *al.*, 2001).

I.1.2. Classification des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont regroupés en 3 classes (Fattal, 2008).

I.1.2.1. Hydrocarbures aliphatiques

Étant des composés non polaires et hydrophobes, les hydrocarbures aliphatiques peuvent contenir des chaînes droites qui peuvent être ramifiées ou non, cycliques, saturés ou insaturés (Militon, 2007) et sont les composants principaux des gaz de combustion (gaz naturel et gaz de pétrole liquéfié), essence et huile de moteur (Wade L.G., 1991 *in* Rocher et Moilleron, 2000).

Les hydrocarbures saturés sont ceux qui ne contiennent que des atomes de carbone et d'hydrogène reliés entre eux par des liaisons simples (Geo, 2018). Les hydrocarbures saturés à chaîne ouverte (alcane ou paraffine) ou hydrocarbures cycliques (cyclane ou naphène) (Druart et *al.*, 2013). Les alcanes sont des hydrocarbures saturés légers et représentent environ 30% du poids des pétroles bruts. Les cyclanes sont des hydrocarbures saturés avec un cycle pouvant être ramifié et constitué de 06 atomes de carbone formant une chaîne carbonée fermée. Les hydrocarbures naphéniques sont peu toxiques et subsistent beaucoup plus longtemps dans le milieu que les alcanes (Fattal, 2008). Selon Marchand et Kantin (1995) *in* Fattal (2008), ces hydrocarbures naphéniques représentent 40 à 50% des composés des pétroles bruts.

Les hydrocarbures insaturés sont plus riches en électrons que les hydrocarbures saturés, ils contiennent au moins une double ou triple liaison. Ils peuvent être également cycliques ou

acycliques (Geo, 2018). Parmi ces hydrocarbures insaturés on distingue les alcènes (double liaisons), les alcynes (triples liaisons) et les cyclènes (Druart et al 2013).

I.1.2.2. Résines et les asphaltènes

Ils représentent les fractions les plus lourdes des hydrocarbures. Les résines sont constituées de plus de six molécules de type benzénique, elles sont également riches en carbone. Sur les littoraux, ce groupe de composés est généralement le plus persistant car ils forment des goudrons (Fattal, 2008). Les résines regroupent essentiellement les composés contenant un ou plusieurs hétéroatomes et ce sont des composés oxygénés comme les aldéhydes, les cétones, les composés azotés, les acides et éthers cycliques (Bocard, 2006).

Les asphaltènes sont des composés stables de très haut poids moléculaire. En plus des atomes de carbone et d'hydrogène, ils contiennent du soufre, de l'oxygène, des hétéroatomes d'azote ainsi que d'autres composants à l'état de trace tels que le nickel et le vanadium (Marchand, 1998 *in* Fattal, 2008). On retrouve les asphaltènes dans les résidus de raffinage et ils sont caractérisés par un point d'ébullition élevé. Selon l'origine, une concentration élevée en asphaltènes (jusqu'à 50% de leur poids) est retrouvée dans certains pétroles (Fattal, 2008).

I.1.2.3. Hydrocarbures aromatiques

Ils contiennent au moins un cycle benzénique et comprennent des composés qui sont insaturés et dont la molécule contient de 1 à 6 cycles benzéniques (Fattal, 2008).

Les HAM contiennent un seul cycle benzénique (BTEX par exemple). Les hydrocarbures aromatiques tels que le benzène (Druart et al., 2013) comprend un anneau aromatique à 6 atomes de carbone (un cycle aromatique) (Fattal, 2008).

Les HAP contiennent plus d'un cycle (naphtalène constitué de deux cycles, pyrène constitué de quatre cycles et l'anthracène contenant trois cycles). Ces HAP forment généralement 15 à 40% des pétroles bruts et ont un impact sur la faune et la flore car ils sont toxiques et persistants. Cette toxicité est due à leur insolubilité. Le benzo(a)pyrène qui est peu soluble et qui se bio-accumule fortement est l'un des HAP les plus dangereux (Fattal, 2008). Plusieurs HAP sont connus pour être cancérigènes et sont également produits par la combustion incomplète d'hydrocarbures pétroliers et de diverses matières organiques comme le bois et le charbon (Bocard, 2006).

I.2. Sources de pollution dans une station service

I.2.1. Sources naturelles

La présence de façon naturelle des hydrocarbures dans le sol est due à des sources importantes qui sont les feux de forêt, de prairies (Jumeau, 1999 *in* Rocher et Moilleron, 2000) et à d'autres sources comme les éruptions volcaniques, l'érosion des roches, les fuites des réservoirs naturels ainsi que la production d'hydrocarbures par les végétaux supérieurs ou les algues (Rocher et Moilleron, 2000).

I.2.2. Sources anthropiques

L'homme de par ses activités, génère des hydrocarbures qui sont présents dans le sol et dans l'environnement. Ces hydrocarbures proviennent, en général, des pollutions par le pétrole (production, raffinage, transport, stockage et utilisation de produits pétroliers) (https://wiki.aurea.eu/index.php/les_hydrocarbures) ou la combustion de fuel (Colin, 2000). Ils peuvent aussi provenir de l'industrie chimique de base, d'usines à gaz, des industries mécaniques, de la fabrication du caoutchouc et de la pétrochimie (https://wiki.aurea.eu/index.php/les_hydrocarbures). Ils peuvent provenir également du chauffage urbain et des diverses industries qui emploient des processus pyrolytiques (production de coke, craquage catalytique) qui constituent des sources importantes d'hydrocarbures en milieu urbain. Mais la circulation automobile reste l'une des principales sources émettrice d'hydrocarbures (Rocher et Moilleron, 2000).

I.3. Sources de pollution dans une station service

Les stations-services représentent une source importante de pollution car les accidents qui se produisent dans ces stations provoquent, le plus souvent, des pollutions du sol et du sous-sol. La pollution du sol dans ces stations-services est due, d'une part à une pollution chronique qui se produit sur une longue période et étant due à la corrosion des cuves enterrées le plus souvent (Patej, 2002) ou à la corrosion (ou fuite) des canalisations enterrées (Piedrafita et Carnicer, 2007). D'autre part, une pollution accidentelle peut être causée par le déversement d'hydrocarbures lors du remplissage des stockages de la station ou de la distribution de carburants (Patej, 2002). On trouve dans une station des liquides comme les carburants (essence, gazole) et les lubrifiants (huiles, graisses, liquides de freins) qui sont susceptibles de provoquer une contamination du sol et/ou des eaux souterraines. De faibles quantités d'essence ou de carburant diesel peuvent causer des conséquences négatives pour l'homme et son environnement (Piedrafita et Carnicer, 2007).

I.3.1. Carburants

Ils sont stockés et vendus dans les stations, les carburants (essence et gazole) sont des mélanges complexes d'hydrocarbures pétroliers. La composition en hydrocarbures dépend de facteurs comme l'origine du pétrole brut soumis au raffinage et ses conditions (Piedrafita et Carnicer, 2007).

I.3.1.1. Essence

L'essence est un liquide incolore mais pouvant être colorée en jaune. Elle a une odeur caractéristique (Piedrafita et Carnicer, 2007) et contient en général environ 230 hydrocarbures différents ayant entre 4 à 10 atomes de carbone. La distillation des essences est effectuée à une température comprise entre 30 et 35° et de 180 à 200°C et elles ont une densité moyenne de 0,72 à 0,77. Les essences sont composées des n-alcanes, des cycloalcanes, des alcènes et des aromatiques (Saada *et al.*, 2006).

I.3.1.2. Gazoles

Elles sont composés d'iso-alcanes, de cyclanes et de composés aromatiques (Saada et *al.*, 2005), les gasoils contiennent 2000 à 4000 hydrocarbures différents et ne contiennent pas d'alcènes (Saada et *al.*, 2006). Possédant un nombre d'atome variant entre 11 et 25, les gazoles sont distillés à des températures comprises entre 180 et 380°C et une densité de 0.82 à 0.86 (Saada et *al.*, 2005).

La figure 1 représente les différents constituants des gasoils et de l'essence.

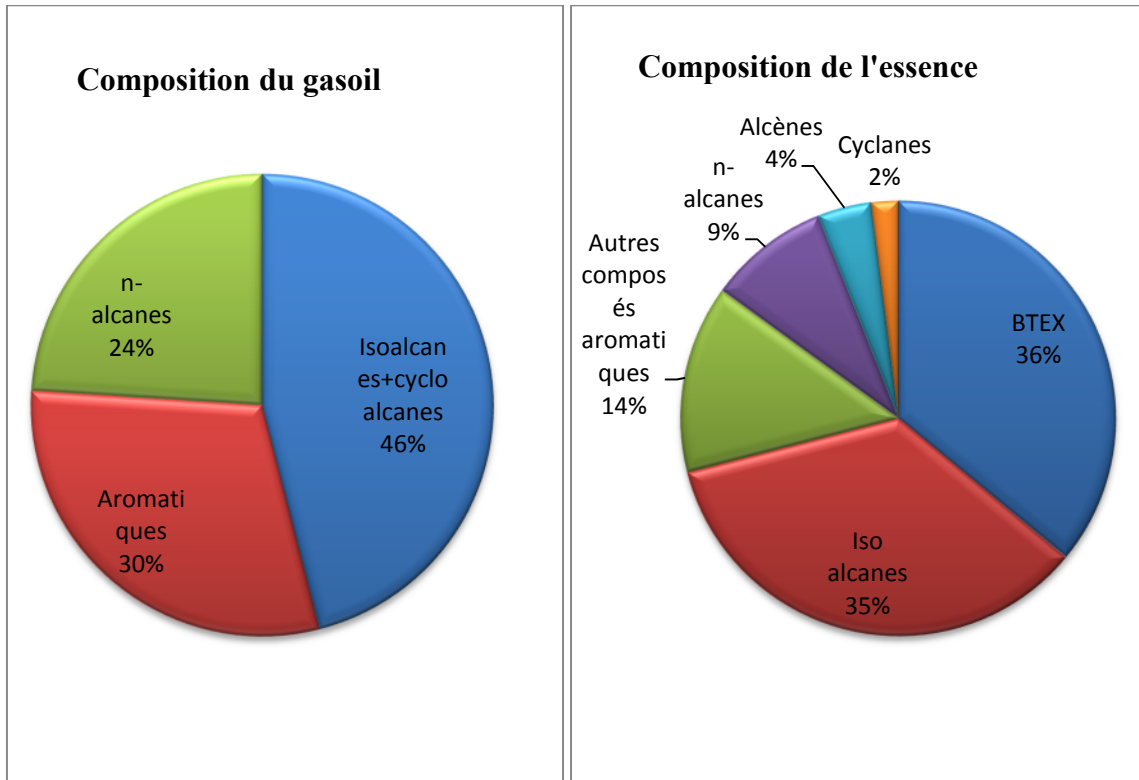


Figure 1 : Composition de l'essence et du gazole (Marchal et *al.*, 2003)

I.4. Effets de la pollution

I.4.1. Effets de la pollution sur le sol

I.4.1.1. Effets de la pollution sur les propriétés physiques du sol

Les hydrocarbures qui sont des corps gras enrobent les particules minérales qui ne pourront plus se lier entre elles ; et donc il y aura une dispersion de ces particules (Rouquerol et *al.*, 1987). Étant des corps gras la présence des hydrocarbures dans le sol améliore sa stabilité structurale, diminue sa mouillabilité (Mettauer et *al.*, 1987 in Fezani et Khider 2007) et augmente la rétention de l'eau dans le sol (un sol pollué par les hydrocarbures contient jusqu'à 2% de plus d'eau qu'un sol non pollué) (Ben Kherfila, 2020). Mais quant aux fractions lourdes des hydrocarbures (résines et asphaltènes), leur présence dans le sol provoque le colmatage du sol et après on a également une dégradation de la structure (Rivière J. L., 1998).

I.4.1.2. Effets de la pollution sur les propriétés chimiques du sol

Pour les effets sur les propriétés chimiques, il y a la diminution du pH du sol ainsi que de sa teneur en K et en Ca (Chaîneau et *al.*, 1996). Il y a également une diminution de la teneur du sol en N (Rivière J.L., 1998) et P (Chaîneau et *al.*, 1996) ; et ici les hydrocarbures diminuent la biodégradation (Rivière J.L., 1998). Aussi il y a l'augmentation de la concentration du sol en éléments à l'état de traces (le Mn, le Fe, le Zn, le Pb) (Sauchelli, 1996 in Fezani et Khider, 2007) et une augmentation de la CE (Karagiannidis, 1999 in Fezani et Khider, 2007).

I.4.1.3. Effets de la pollution sur les propriétés biologiques du sol

Les effets des hydrocarbures sur l'activité biologique du sol dépendent de leur nature, de leur concentration dans le sol et d'autres facteurs liés au milieu (Duchaufour, 2001). Plusieurs composés organiques peuvent inhiber le métabolisme et la croissance des microorganismes (Girard et *al.*, 2005) et lorsqu'ils (les hydrocarbures) s'imprègnent des sols alors cela a pour effet global une multiplication intense de la microflore en particulier des bactéries, des champignons et des levures (Rouquerol et *al.*, 1987).

I.4.2. Effets de la pollution sur les microorganismes

Si la concentration en pollution est forte, alors il y aura disparition des espèces sensibles (par exemple les ammonificateurs, nitrificateurs, cellulolytiques) et prolifération des espèces adaptées (dégradantes) (Rivière J. L., 1998).

I.4.3. Effets de la pollution sur la végétation

Ces polluants inhibent la germination des graines et la croissance des plantes (Girard et *al.*, 2005) ; donc il y aura une baisse de la biomasse (Judy et *al.*, 2014 in Gouhier, 2014). Cette inhibition peut se faire de façon directe (les hydrocarbures pénètrent dans l'embryon) ou indirecte (lorsque les hydrocarbures modifient les conditions du sol et aussi lorsque c'est juste les réactions qui sont inhibés) (Rivière J.L., 1998). Les hydrocarbures peuvent pénétrer dans les graines et empêcher les réactions métaboliques et aussi tuer l'embryon par une toxicité aigue. Il y a aussi une forte évidence que l'inhibition de la germination soit liée à l'hydrophobie des hydrocarbures qui empêchent et/ou réduit les échanges d'eau et de gaz surtout l'oxygène (Udo et Fayemi, 1975). Si la concentration de la pollution est élevée, alors toutes les plantes et végétations mourront et aucune autre végétation ne pourra s'installer à nouveau (Rivière J.L., 1998). Comme effets des hydrocarbures sur les végétaux il y a les brûlures des parties aériennes et des nécroses ou déformations des zones de croissance qui induira à la suppression ou au retard de la floraison ou de la fructification (Michel et *al.*, 1986 in Nait et Djenad, 2015), la réduction de la photosynthèse et l'empêchement de l'éclosion de nouveaux bourgeons (Judy et *al.*, 2014 in Gouhier, 2014).

I.5. Devenir du carburant dans le sol

Comme illustré dans la figure 2, le devenir et le transport d'un contaminant est contrôlé par ses propriétés physico chimiques et la nature et composition du milieu dans lequel il est en migration (Saada et *al.*, 2005).

I.5.1. Volatilisation

La volatilisation qui débute immédiatement après un déversement d'hydrocarbures et qui peut se poursuivre pendant quelques jours correspond au transfert des composés volatils plus légers comme les aliphatiques, les BTEX et les HAP de faible masse moléculaire vers l'atmosphère (Neff et *al.*, 2000). La volatilisation qui conduit souvent à une pollution atmosphérique fait partie de la mobilisation (Soltani, 2004). Le phénomène de volatilisation dépend de la pression de vapeur de chaque composé, de la densité des vapeurs des contaminants et des propriétés du sol (Saada et *al.*, 2005).

I.5.2 Solubilisation

Les hydrocarbures sont très peu solubles dans l'eau, mais certains d'entre eux (les hydrocarbures aromatiques, hydrocarbures à faible nombre de carbone) peuvent se dissoudre partiellement. Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et sa polarité élevée (Soltani, 2004). Les hydrocarbures solubles sont difficiles à éliminer et font parti des plus dangereux pour l'environnement (Chocat, 2004).

I.5.3. Sorption

Après avoir pénétré dans le sol, les polluants sont absorbés par celui-ci, où ils restent en phase gazeuse ou en solution (Koller, 2009). Une partie des hydrocarbures après avoir pénétré dans le sol peut s'adsorber (fixation en surface) à la matrice du sol et formé des liaisons avec la matière organique. Les hydrocarbures se fixent facilement sur les minéraux argileux et la matière organique, surtout si cette dernière a atteint une certaine maturité. En effet, plus la matière organique est mature, plus elle perd de sa polarité, et plus les hydrocarbures auront d'affinité pour elle (Saada et *al.*, 2005).

I.5.4. Dégradation

Les hydrocarbures une fois sorbés au sol peuvent subir des dégradations abiotiques (réaction d'oxydoréduction, d'hydrolyse, de photochimie) ou biotiques (par l'intervention des microorganismes) (Gabet, 2004). Les hydrocarbures aliphatiques tels les alcanes se dégradent plus facilement que les hydrocarbures aromatiques et plus le poids moléculaire diminue, plus la dégradation est rapide (Prince et *al.*, 2003 et Fingas, 2011) et une chaîne droite se dégrade facilement plus qu'une chaîne droite ramifiée (Rivière J. L., 1998). La biodégradation des hydrocarbures qui commence généralement entre la première et la deuxième semaine après le déversement (CEAEQ, 2015) se fait dans les milieux aérobies et anaérobies grâce à des microorganismes principalement des bactéries et /ou des champignons qui puisent leur alimentation dans les hydrocarbures (Fattal, 2008).

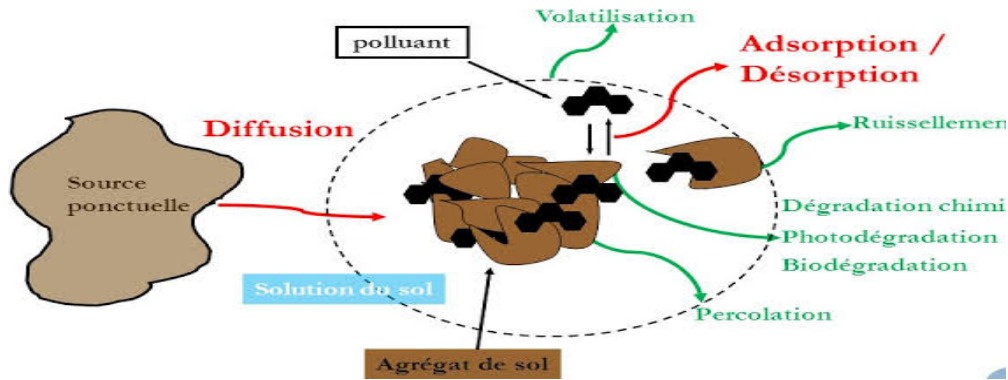


Figure 2 : Devenir d'un polluant organique au niveau du sol (Pernot, 2012)

II. Décontamination des sols

La décontamination est un ensemble de procédés qui consiste à épurer ou tout au moins à isoler un milieu ayant été exposé à une pollution chronique ou récurrente qui l'a rendu inutilisable pour des activités domestiques, agricoles ou industrielles. Le processus de décontamination concerne les terres excavées ou sols et nappes phréatiques encore en place (Koller, 2009).

II.1. Mode d'application des techniques de traitement de pollution

Les stratégies de traitement des matrices polluées reposent sur des opérations dites 'hors site', 'sur site' et 'in situ' (Simonnot et Croze, 2008).

II.1.1. Traitement hors site (ex situ)

Il s'agit d'une excavation/extraction du milieu pollué et son évacuation vers un centre de traitement spécialisé (incinérateur, CET) (Simonnot et Croze, 2008).

II.1.2. Traitement sur site (on site)

Il consiste à excaver les sols ou eaux pollués et à les traiter sur le site même (Simonnot et Croze, 2008).

II.1.3 Traitement in situ (en place)

Ce traitement qui s'agirait soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol, correspond à un traitement sans excavation (le sol ou les eaux sont laissés en place) (Simonnot et Croze, 2008) en apportant de l'oxygène qui va favoriser la croissance des microorganismes destinés à dégrader le polluant. Souvent il est nécessaire d'apporter aussi des éléments nutritifs comme l'azote et le potassium qui se révéleraient présents insuffisamment dans le sol (David, 2013).

II.2. Procédés de traitement des sols pollués

II.2.1. Procédés physiques

Comprenant notamment le confinement, la stabilisation, l'incinération, la désorption thermique, le pompage, la volatilisation (ou venting), les traitements physiques consistent soit à immobiliser les polluants, soit à apporter de l'énergie par voie thermique, mécanique ou électrique pour dégrader ou extraire ces polluants (Simonnot et Croze, 2008).

II.2.2. Procédés chimiques

Ces traitements pouvant être in-situ ou hors-site, ils ont pour fonction de détruire ou transformer les polluants en une forme moins nocive pour l'environnement en injectant dans le sol un réactif chimique approprié au type de pollution (Hanna, 2004) ; et par la suite en provoquant des réactions chimiques entre ce réactif et les polluants présents dans le sol (Colin, 2000). Pour que tout ceci se réalise il faut nécessairement que le sol et les réactifs soient bien mélangés et que le réactif soit mis en léger excès (Hanna, 2004).

II.2.3. Procédés thermiques

Méthode utilisant les températures hautes pour détruire les produits polluants, elle est efficace pour une gamme très large de produits (moins les métaux) et représente une option courante dans les filières de décontamination à ce jour (Koller, 2009).

II.2.4. Traitements biologiques

Utilisant le potentiel des microorganismes (champignons, bactéries, actinomycètes, algues) ou des organismes supérieurs (végétaux) (Delage et Schrefler, 2005) à dégrader certains types de contaminants, cette biodégradation peut se faire sous conditions aérobie ou anaérobie (Norini, 2007).

La bioremédiation est l'activation de la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes (pouvant être indigènes ou exogènes, prélevés sur le site contaminé, cultivés au laboratoire puis réintroduits dans le sol), la plupart du temps microscopiques (bactéries, micro algues, champignons) à dégrader les polluants (Abdelly, 2007).

La phytoremédiation est un ensemble de techniques exploitant l'aptitude des plantes à décontaminer les sols.

III. Phytoremédiation

III.1 Définition de phytoremédiation

Etymologiquement, le terme phytoremédiation venant du grec « phyton » qui signifie plante et du latin « remedium » qui veut dire rétablissement de l'équilibre, remédiation (Kirpichtchikova, 2009) désigne l'utilisation de végétaux supérieurs pour extraire, stabiliser ou dégrader des substances polluantes (Cunningham and Berti, 1993). La phytoremédiation qui peut être aussi définie comme l'utilisation des plantes pour éliminer ou transformer les polluants en composés moins toxiques, est utilisée aussi bien pour les contaminants

organiques qu'inorganiques présents dans les milieux solides, liquides et gazeux (Abdelly, 2007).

III.2. Principe de la phytoremédiation

Elle repose essentiellement sur les interactions entre les plantes, le sol et ses microorganismes. Les plantes vont soit absorber le polluant pour le métaboliser ou le stocker, soit réduire voire empêcher la libération du polluant dans d'autres compartiments de l'environnement (Messou et *al.*, 2013). Certaines plantes ont la capacité d'extraire du sol les polluants par leurs racines et les transférer et concentrer dans d'autres endroits de la plante (les tiges, les branches et les feuilles). Elles sont capables d'absorber différents types de pollution tels les hydrocarbures, les métaux, les pesticides, les explosifs (Matsodoum Nguemte, 2019). Un autre rôle qu'ont les plantes est leur capacité à empêcher la propagation de la pollution hors du site par le vent ou la pluie (Koller, 2009).

III.3. Stratégies de phytoremédiation

Comme mentionné dans la figure 3, les plantes utilisent plusieurs stratégies pour dépolluer les contaminants.

III.3.1. Phytoextraction (ou phytoaccumulation)

La phytoextraction est l'utilisation des plantes accumulatrices (hyper accumulateurs) 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 celles-ci puissent le tolérer et l'absorber (Koller, 2009).

La phytoaccumulation est définie par une concentration de polluants très importante non dégradés rapidement ou très lentement dans la plante. On parle alors de plantes accumulatrices et/ou hyper accumulatrices capables de tolérer et d'accumuler ces polluants (San Miguel, 2011).

III.3.2. Phytostabilisation

Consistant à minimiser la dispersion des polluants dans le sol (San Miguel, 2011), la phytostabilisation désigne l'utilisation de plantes pour réduire la biodisponibilité, la mobilisation ou le lessivage des polluants et, par conséquent, leur entrée dans la chaîne alimentaire ou dans les nappes phréatiques (Koller, 2009).

III.3.3. Phytotransformation (ou phytodégradation)

Elle utilise les plantes et les microorganismes associés pour dégrader les polluants organiques du sol (Abdelly, 2007) ou pour transformer au niveau de la rhizosphère les polluants organiques toxiques en substances moins toxiques (Kirpichtchikova, 2009). Dans la phytodégradation certaines plantes produisent des enzymes destinés à catalyser la dégradation des substances polluantes toxiques absorbées ou adsorbées qui seront par la suite transformées

en substances moins ou non toxiques par la métabolisation des polluants dans les tissus des plantes, ou/et par les organismes de la rhizosphère maintenue par la plante (on parle alors de rhizodégradation) (Koller, 2009).

III.3.4. Rhizodégradation

C'est la dégradation des polluants, pour la plupart organiques, sous l'action de l'association racines et micro-organismes. La rhizodégradation a lieu dans le volume de sol sous l'influence de la rhizosphère (Sterckeman et *al.*, 2011).

III.3.5. Phytovolatilisation

Elle est un mécanisme particulier par lequel les plantes phytoextractrices extraient les polluants du sol (Zayed and Terry, 1994) et les transforme en composés volatils (Abdelly, 2007) pour ensuite les libérer dans l'atmosphère via les zones foliaires d'échanges gazeux que sont les stomates (Zayed and Terry, 1994). Le mécanisme de phytovolatilisation est négatif en termes de phytoremédiation car la pollution se trouve déplacée d'un compartiment à un autre sans diminution quantitative de la charge polluante et parfois sans diminution du pouvoir toxique de ces contaminants (San Miguel, 2011).

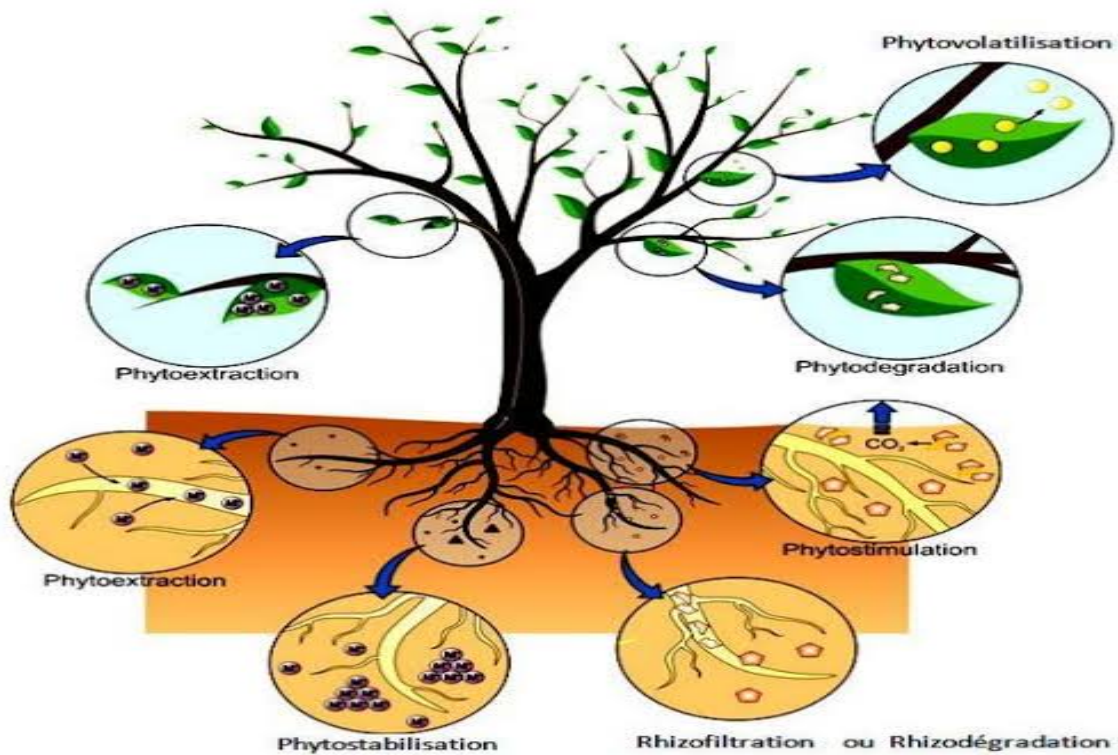


Figure3 : Les différents mécanismes de la phytoremédiation des sols (Alchimia, 2016)

III.3.6. Limites et avantages de la phytoremédiation

III.3.6.1. Limites de la phytoremédiation

- L'action de la plante est limitée généralement au sol de surface, voire au sol rhizosphérique, et dépend fortement de la biodisponibilité des polluants dans cette zone (Walton and Anderson, 1992) ;
- La dépollution par les plantes y compris les autres méthodes biologiques ne permet pas de réduire ou d'éliminer la pollution à 100%. (Kirpichtchikova, 2009) ;
- Le temps de traitement est généralement long et le procédé dépend de la météorologie, des attaques des insectes, des micro-organismes et des substances phytopathogènes (Koller, 2009) ;
- La réintroduction des polluants dans l'environnement du fait de la chute des organes aériens des plantes accumulatrices au niveau du sol ; et une contamination partielle de la chaîne alimentaire via une consommation accidentelle des plantes épuratrices par des herbivores au niveau des sites traités (Van Nevel et *al.*, 2007) ;
- Nécessite une étude au cas par cas : choix des espèces, traitement du sol (Vavasseur et *al.*, 2008) ;
- Difficulté de dépollution quand les terres sont contaminées par plusieurs polluants, tous à des concentrations différentes et répartis de manière hétérogène (Touvron, 2018).

III.3.6.2. Avantages de la phytoremédiation

- Elle est applicable à un grand nombre de polluants et ne provoque qu'un minimum de perturbations dans l'environnement (Raskin et *al.*, 1994b). Son coût est faible et elle est plus respectueuse de l'environnement (Cunningham et *al.*, 1995 ; Pilon-Smits, 2005) ;
- Elle est adaptée pour les grandes surfaces contaminées (Koller, 2009) et requiert moins d'équipement car la plupart du travail est fait par les plantes (Pilon-Smits, 2005) ;
- Elle absorbe les GES par photosynthèse, entraîne peu de désagréments visuels ou sonores, préserve la structure et l'activité biologique du sol, répond aux critères du développement durable et est mieux perçue par le public (Dechamp et Meerts, 2003 ; ADEME, 2010) ;

- Elle garantit un couvert végétal qui freine l'érosion et le lessivage des particules du sol, assure une augmentation des infiltrations, participe à la beauté du paysage (Dechamp et Meerts, 2003) et permet de réduire le déplacement des polluants dans l'air, l'eau ou le sol (sauf dans le cas de la phytovolatilisation) (Bert et Deram, 1999) ;
- Générant de faibles quantités de résidus (Bert et Deram, 1999), elle est plus respectueuse de l'environnement (Kirpichtchikova, 2009) et peut être appliquée préventivement ou en complément des autres techniques de remédiation (Vanobberghen, 2010) ;
- Valorisation des produits issus de la phytoremédiation (INRA, 2009).

Matériels et méthodes

Notre travail a pour objectif d'essayer de décontaminer un sol pollué par les hydrocarbures par phytoremédiation en utilisant des variétés différentes d'une même légumineuse «le pois chiche» pour comparer l'efficacité de ces différentes variétés de pois chiches à remédier au sol contaminé par les hydrocarbures et également pour voir laquelle de ces variétés dégrade beaucoup plus les hydrocarbures contenus dans le sol de la station. Cette expérience a été réalisée au sein du laboratoire de PSEMRVC de la faculté des Sciences Biologiques et Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de TO.

I. Description et localisation du site d'échantillonnage du sol

La station d'étude qui s'étend à une superficie de 30.67ha est située au Nord-Ouest de Boukhalfa en zone de montagne (300m d'altitude) à 5km du chef-lieu de la wilaya de TO, au Nord-Ouest de la ville de TO, sur la RN°12 reliant Alger à TO. La station est entourée de terres agricoles et se trouve à proximité d'un oued. La station comporte 5 cuves (cuves souterraines de 20, 30, 50ml) à 1 event pour chaque cuve. Les dalles de 25 à 30cm d'épaisseur sont en béton vu que les zones sont marécageuses afin d'assurer la conservation.

Le choix de cette station est justifié par le fait qu'il y ait des fuites ou des déversements accidentels de carburants pendant la distribution ou le remplissage des stockages et cela conduira sans doute à une pollution des sols, des sous sols, des terres agricoles et de l'oued proches de la station et des eaux souterraines. La localisation de la station est représentée dans la figure 4.

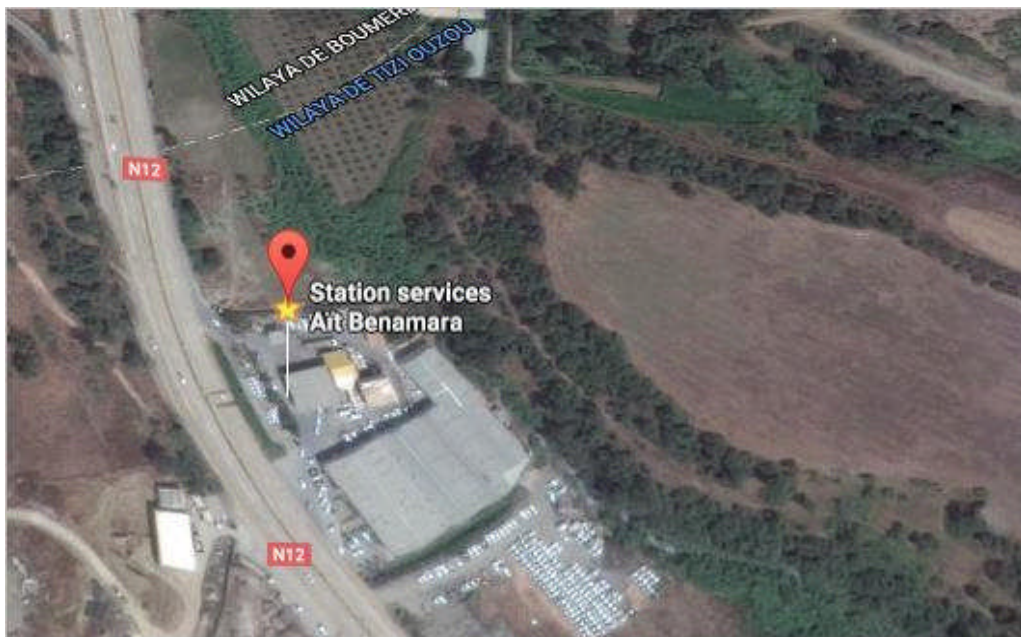


Figure 4 : Localisation de la station-service de Boukhalfa (Google Maps, 2021)

II. Matériels

II.1. Sol

L'étude a été réalisée sur un échantillon de sol contaminé par les rejets de carburant provenant de la station-service de Boukhalfa. Les analyses physico-chimiques effectuées sur le sol pollué montrent que c'est un sol de pH basique (8,15) et de texture limono-argileuse (lourd) (Ibarki et Heasis, 2020 *in* Belaid et Abdi, 2021).

II.2. Matériel végétal

Pour la phytoremédiation 5 variétés de pois chiches (*Cicer arietinum* L.) ont été utilisés à savoir Ain zada (Ghab05) ou Flip 88-85C (Var.1), Makerra ou Flip 01-29C (Var.2), El Ogbane ou Flip 08-42C (Var.3), Béni chograne ou Flip 84-92C (Var.4) et Oued rhumel (Ghab 04) ou Flip 93-93C (Var.5).

Duchaufour (2001) préconise l'utilisation des légumineuses pour diminuer la pollution du sol par les hydrocarbures. Les légumineuses grâce à leurs systèmes racinaires puissants procurant une bonne aération au sol et stimulant l'activité microbienne qui joue un rôle primordial dans cette décontamination et, par conséquent, accélère les phénomènes de dégradation naturelle.

II.2.1. Ain zada (Ghab 05) ou Flip 88-85C

Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau I.

Tableau I : Caractéristiques de la variété 'Ghab 05'

Ghab 05	<ul style="list-style-type: none"> - Testé sous le nom de Flip 88-85C, Ghab05 a été développé à partir d'un croisement entre ILC 629 et Flip 82-144C en Syrie (Nassif et <i>al.</i>, 2005). - Semis d'hivers, port érigé, grain moyen, rendement élevé, semi-précoce à semi-tardive (ITGC, 2013), résistant à l'antracnose (Amri et <i>al.</i>, 2019) ; - Type Kabuli, résistante à la pique ascochytiqque, graines en forme de tête de bélier, graines de couleur beige, tolérante au froid et quand elles sont plantées en hivers les plantes Ghab 5 mesurent 55 cm de haut et mettent 125jrs pour fleurir et 168jrs pour mûrir (Nassif et <i>al.</i>, 2005).
---------	--

II.2.2. Makerra ou Flip 01-29C

Ses caractéristiques sont consignées dans le tableau II.

Tableau II : Caractéristiques de la variété ‘Makerra ou Flip 01-29C’

Makerra ou Flip 01-29C	<ul style="list-style-type: none"> - Variété nouvellement introduite (ITGC, 2011) ; - Tolérante à l’anthracnose (Dahmane et Lakhdari, 2020) ; - Précoce, tolérante au froid et possède des grains de qualité (Zeghouane, 2018).
-------------------------------	--

II.2.3. El ogbane ou Flip 08-42C

Les caractéristiques de cette variété sont consignées dans le tableau III.

Tableau III : Caractéristiques de la variété ‘El ogbane ou Flip 08-42C’

El ogbane ou Flip 08-42C	<ul style="list-style-type: none"> - Semence de type Kabuli, la variété El ogbane est une variété nouvellement introduite (ITGC, 2011) ; - El ogbane a pour source ICARDA (Gemedda et <i>al.</i>, 2020) et Iran (Rezai et <i>al.</i>, 2015) ; - El ogbane est caractérisée aussi par la précocité, la qualité du grain et la tolérance au froid et à l’anthracnose (Zeghouane, 2018)
---------------------------------	---

II.2.4. Béni chograne ou Flip 84-92C

Cette variété Flip 84-92C de type Kabuli (ITGC, 2018) est résistant au froid (ICARDA et *al.*, 2005). Elle présente également les caractéristiques suivantes (Kebaili, 2008). Les autres caractéristiques de la var. Flip 84-92C sont illustrées dans le tableau IV.

Tableau IV : Caractéristiques de la variété Flip 84-92C (Station I.T.G.C. El-Khroub)

Origine	Syrie
Ramification	Forte
Nombre de gousse par plante	170
Couleur de la fleur	Blanche
Rendement	33,06 Qtx/Ha
Anthracnose	Tolérant
Fusariose	Moyennement sensible
Port de la plante	Semi-érigé
Taille de la gousse	Moyenne
Nombre de grains par gousse	1
Couleur du grain	Beige
Forme du grain	Angulaire
Taille du grain	Moyenne
Hauteur de la plante	52cm

II.2.5. Oued rhumel (Ghab 04) ou Flip 93-93C

Ghab 4 est une sélection de Flip 93-93C, développé par l'ICARDA et qui a été procuré par le CNCC (Amri-Tiliouine, 2020). La variété Ghab 4 qui est ridée (ITGC, 2011) est caractérisée par la qualité de son grain, sa précocité, sa résistance (tolérance) au froid, à l'anthracnose (Amri et *al.*, 2019 ; Zeghouane, 2018) et à la brûlure ascochytiqque (Sabaghpour et *al.*, 2004). Les autres caractéristiques de Flip 93-93C sont consignées dans le tableau V.

Tableau V : Caractéristiques de la variété Ghab 04 (ITGC, 2011)

Taille des grains	moyenne
Couleur	Brun clair
Hauteur	40 à 60 cm
Poids de 100 grains	26 à 45 g
Nombre de gousses par plante	20 à 45
Rendement en grains	10 à 15 qha ⁻¹
Type	Kabuli
Origine	ICARDA, Alep-Syrie

II.2.6. Maïs (*Zea mays* L.)

Le maïs (*Zea mays* L.) a été utilisé pour tester l'efficacité de la phytoremédiation à la fin de l'expérience car celui-ci est une espèce sensible à la pollution par les hydrocarbures (Chaineau et *al.*, 1996).

Les graines ont été fournies par l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) d'Oued Smar (Alger).

III. Méthodes

L'étude consiste en une évaluation de l'impact des hydrocarbures sur les cultures des différentes variétés de pois chiches. Les paramètres auxquels nous nous sommes intéressés sont le taux de germination, la biomasse aérienne, la biomasse racinaire et la hauteur des plants.

III.1 Prélèvement du sol

L'échantillonnage du sol (10 Mars 2021) a été fait à l'intérieur de la station et plus précisément à côté des évènements permettant l'évacuation de l'air chargé de vapeurs d'hydrocarbures. Pour cet échantillonnage, dans une surface de 50 m² nous avons tracé une diagonale sur laquelle nous avons délimité 3 zones (carré de 25cm de côté) et c'est à l'intérieur de chaque zone que le sol a été prélevé à une profondeur allant de 0 à 10cm (figure 5).



Figure 5 : Echantillonnage du sol de la station-service (Originale, 2021)

III.2. Préparation du sol et mise en culture

Après l'échantillonnage sur le terrain, le sol a été transporté au laboratoire puis tamisé avec un tamis de 5mm de diamètre afin d'éviter de détruire les agrégats dans lesquels vivent les micro-organismes. Le sol obtenu après tamisage a été reparti sur 15 pots dont le fond est tapissé de cailloux. Chaque pot a reçu 400g de sol. Trois répétitions ont été faites pour chaque variété. Dans chaque pot 5 graines ont été semées (figure 6). Le semis a été effectué le 28 Mars 2021 et un arrosage régulier a été réalisé durant toute l'expérimentation. La récolte a lieu le 12 Mai 2021, suivie du nettoyage des racines des plants de pois chiche.

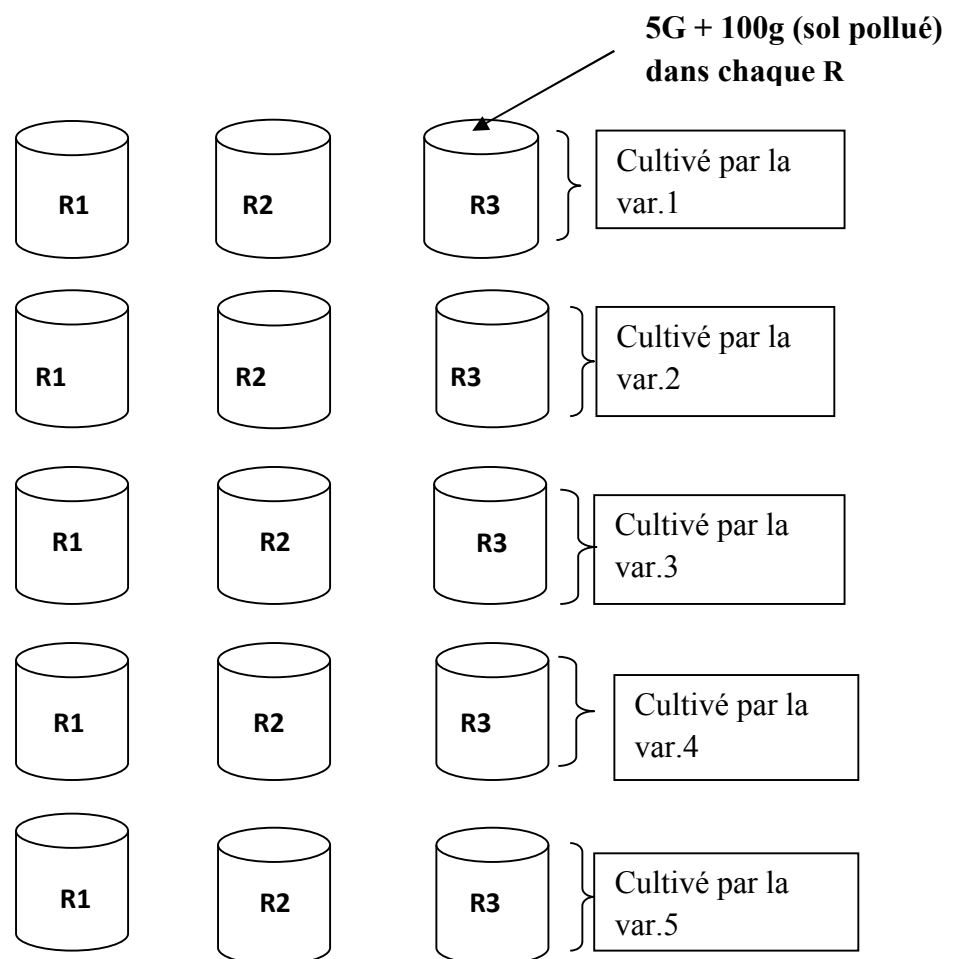


Figure 6 : Schéma du dispositif expérimental

III.3. Effets des hydrocarbures sur les plants de pois chiches

III.3.1. Taux de levée

Il consiste à établir un pourcentage de levée dans chaque pot en dénombrant les graines germées des différentes variétés de pois chiches dans chaque pot. Le taux de levée est calculé comme suit :

$$\text{Taux de levée (\%)} = \frac{\text{nombre de graines germées}}{\text{nombre total de graines}} * 100$$

III.3.2. Hauteur des plants

Elle est évaluée par la mesure en cm, à l'aide d'un double décimètre, de la croissance en longueur des plants.

III.3.3. Biomasse aérienne

Après avoir séché à l'air libre les parties aériennes issues de chacun des pots, elles ont été pesées avec une balance de précision.

III.3.4. Biomasse racinaire.

Après avoir nettoyé et rincé avec de l'eau la partie racinaire des plants de chaque pot, elle a été séchée à l'air libre puis pesée à l'aide d'une balance de précision.

III.4. Evaluation de l'efficacité de la phytoremédiation

Elle a été faite par le biais de bio-essais qui permettent d'utiliser des organismes vivants afin de rendre compte de la toxicité résiduelle dans le sol contaminé après la récolte des plants de pois chiche. Ces essais permettent aussi de comparer entre l'efficacité des variétés testées.

III.4.1. Test de germination

Un test de germination des graines de maïs (*Zea mays* L.) a été réalisé après la récolte des différentes lignées de pois chiche. Ce test ayant pour objectif d'évaluer et l'impact de la concentration des hydrocarbures présents dans le sol sur la germination des graines. Il consiste à établir un taux de germination dans chaque pot en dénombrant les graines germées dans les sols contaminés et traités par phytoremédiation. Dans chaque boîte de Pétri, 10 graines de maïs ont été couvertes avec 100g de sol dépollué. Le calcul du taux de germination est donné par la formule :

$$\text{Taux de germination (\%)} = \frac{\text{nombre de graines germées}}{\text{nombre total des graines}} * 100$$

III.4.2. Longueur des racines

Après avoir dénombré les graines de maïs germées dans chaque pot, nous avons pris 5 graines de chaque pot parmi celles qui ont germé puis nous avons mesuré avec un double décimètre (cm) la longueur de leurs racines avant de les remettre à nouveau dans le sol pour une semaine. Une deuxième mesure de la longueur racinaire des 5 graines déjà mesurées auparavant a encore été faite cette deuxième semaine (18 Juillet 2021) et ensuite on calcule la longueur des racines de cette manière :

$$\text{Longueur des racines} = \text{Longueur de la racine après la 2}^{\text{ème}} \text{ semaine} - \text{la longueur après la 1}^{\text{ère}} \text{ semaine}$$

III.4.3. Survie et croissance des vers de terre

L'expérience avec les vers de terre du genre *Eisenia* consistait à peser 3 vers (poids $0,425 \pm 0,005\text{g}$) et à les mettre dans des pots contenant des échantillons de sol pollué frais (100g), servant de témoin, et de sol dépollué par phytoremédiation. Les pots ont été couverts avec un tissu à mailles serrées afin de permettre la respiration des vers de terre. Le poids a été pris après 14 jours ainsi que le taux de mortalité des vers après une exposition de 24h, 48h, 96h.

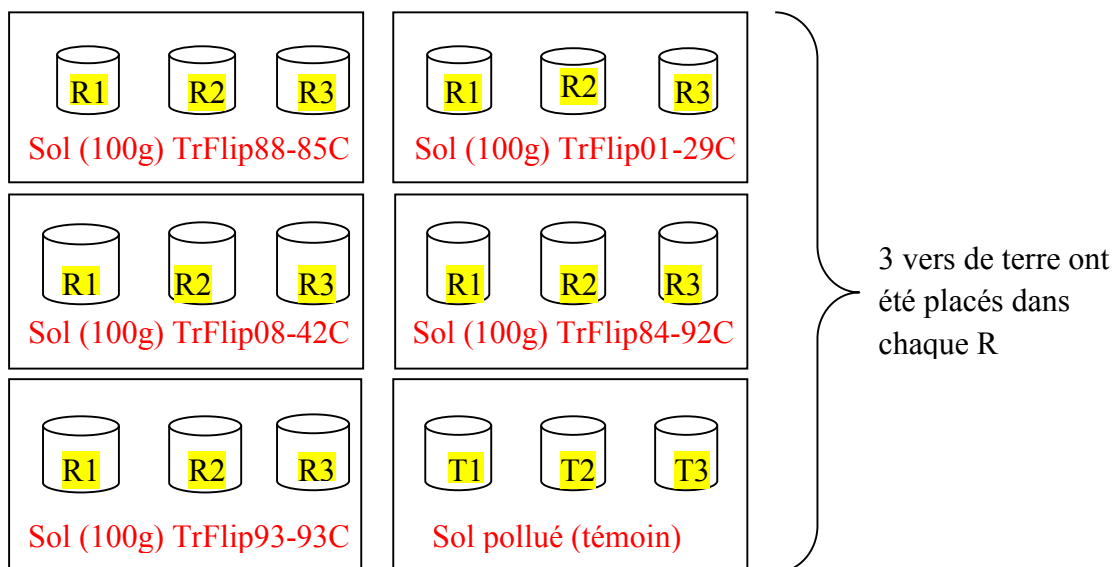


Figure 7 : Schéma du dispositif expérimental de l'expérience sur les vers de terre

III.5. Activité biologique globale

Elle a été évaluée par un test respirométrique. Il permet de mesurer la quantité de CO_2 dégagée par la respiration microbienne du sol. Dans des flacons, nous avons mis dans chacun 50g de sol surmontés de deux tubes à hémolyse, l'un contenant 3ml de H_2O et l'autre 5ml de NaOH à 0,5N que nous avons bien fermé et placé dans l'incubateur à 28°C pendant 7 jours.

L'eau sert à éviter le dessèchement du sol. Le CO_2 dégagé lors de cette incubation est capté par la solution de NaOH. A la fin de l'incubation, NaOH n'ayant pas fixé le CO_2 est titré par une solution d' H_2SO_4 à 0,25N en présence de quelques gouttes de phénolphaléine.

III.6. Activité enzymatique du sol

L'activité enzymatique de la catalase a été mesurée dans le sol après la récolte des plants de pois chiche (figure 8). Une quantité de sol dépollué et non (2,5g) a été mélangée avec 1,25 ml de H_2O_2 à 0,3% et 10 ml de tampon de phosphate à pH 7. Le mélange réactionnel obtenu a été mis dans l'incubateur à 25°C pendant 20 min. Ensuite, nous avons ajouté à ce mélange 1,25 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) afin de stopper la réaction. Le mélange a été filtré avec du papier filtre. Le filtrat est enfin titré par une solution de KMnO_4 à 0,02mol/l.

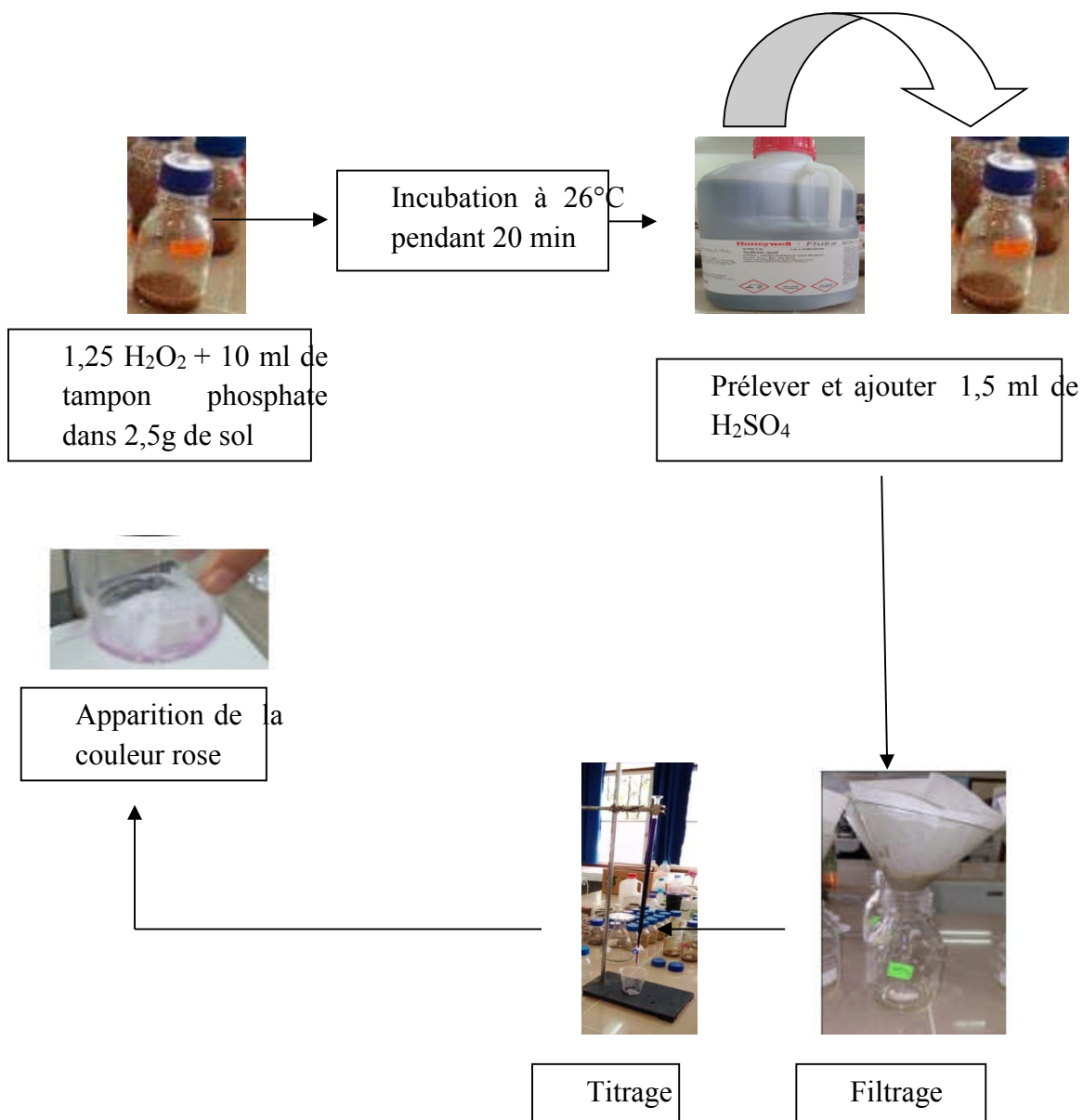


Figure 8 : Protocole de dosage de la catalase (originale, 2021)

III.7. Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été soumis à une analyse statistique effectuée avec le logiciel R 4.0.3. Il s'agit d'une anova à un critère de classification qui est la variété de pois chiche. Lorsque les données ne sont pas gaussiennes, c'est le test de Kruskal-Wallis qui est appliqué.

Lorsque les différences sont significatives, un test post-hoc est appliqué afin d'obtenir les groupes homogènes.

Chapitre III : Résultats et discussions

Résultats et discussions

I. Effets des hydrocarbures sur les plants de pois chiches

I.1. Taux de levée

La figure 9 représente le taux de levée des différents génotypes de pois chiches dans le sol contaminé.

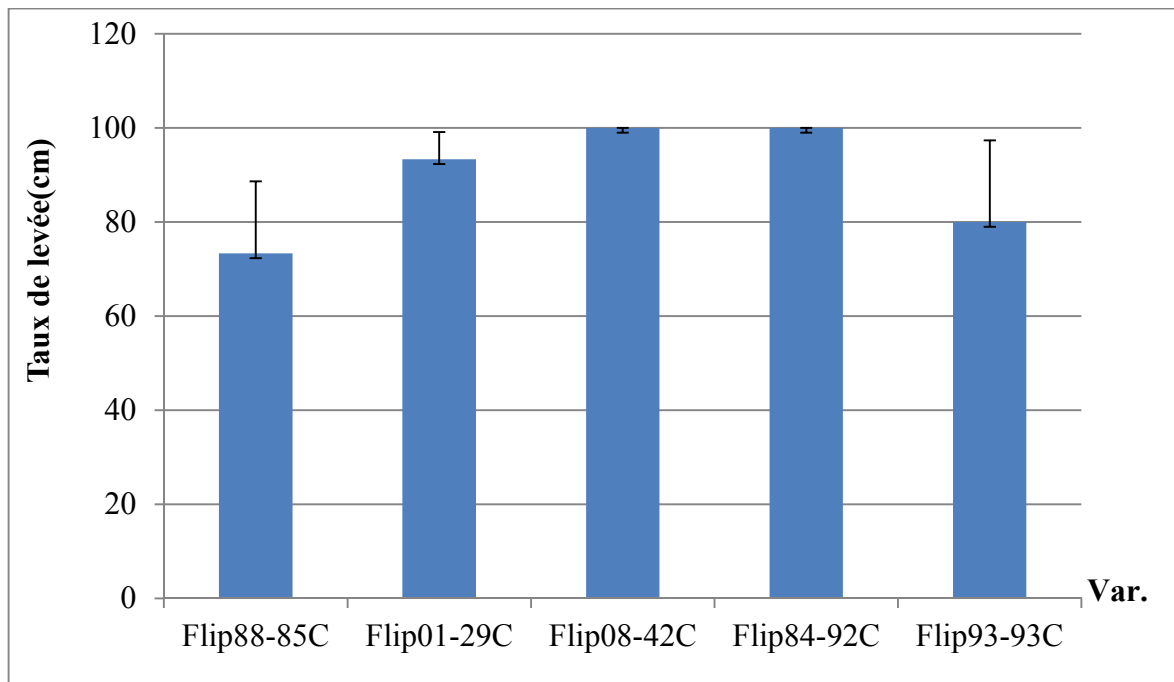


Figure 9 : Taux de levée des différentes variétés de pois chiches

La levée des graines de la var. Flip 88-85C, Flip 01-29C, Flip 08-42C, Flip 84-92C et Flip 93-93C dans le sol pollué a atteint respectivement les pourcentages de 73,33%, 93,33%, 100%, 100% et 80%. Il est à remarquer également que parmi toutes ces var., c'est Flip 08-42 et Flip 84-92 qui ont un taux de levée maximal (100%) par rapport aux 3 var. restantes. Flip 01-29 quant à elle a un taux de levée plus important que Flip 93-93 qui possède elle aussi à son tour un taux de levée supérieur à celui de Flip 88-85.

L'analyse de ces données par le test de Kruskal-Wallis a donné une p-value= 0,35 ; donc pour la levée il n'y a pas de différences significatives entre les 05 variétés de pois chiches.

Les var.3 (Flip 08-42) et var.4 (Flip 84-92) possèdent une levée maximale ; nous dirons alors qu'elles sont tolérantes et/ou résistent aux hydrocarbures. Le taux de levée sera plus important si la teneur des hydrocarbures dans le sol est minime. Nos deux variétés (3 et 4) ont pu dégrader les hydrocarbures car peut être elles sont arrivés à améliorer l'activité microbienne dans la rhizosphère et les activités des enzymes de détoxification de la plante elle-même. L'efficacité de ce processus est parfois associé à un nombre élevé de

microorganismes et leurs activités de dégradation dans la rhizosphère des plants (Muratova et al., 2003).

I.2. Hauteur des plants

La figure 10 représente la hauteur des plants des différentes variétés de pois chiches dans le sol contaminé.

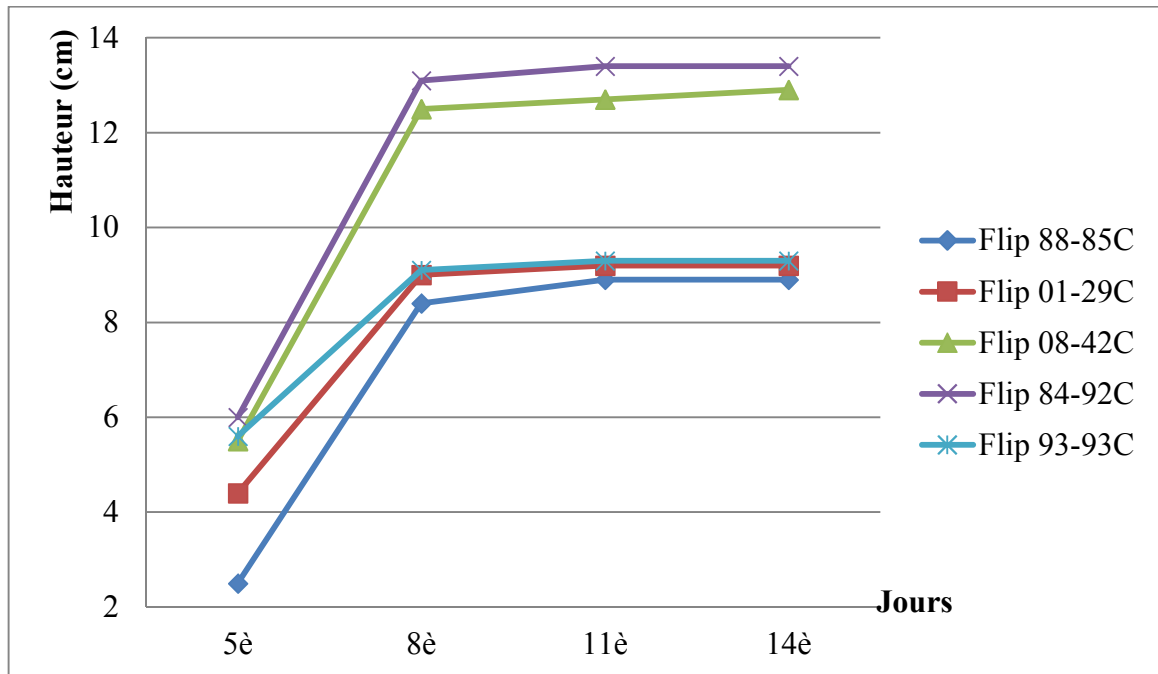


Figure 10 : Hauteur moyenne des plants des variétés de pois chiche

La figure 10 représente l'évolution de la hauteur des plants des différentes variétés de pois chiches tous les 3jrs dans le sol pollué. Et d'après cette figure nous constatons qu'au début de la culture (entre le 5^e et le 8^e jr) toutes les var. de pois chiches présentaient une croissance assez rapide, mais à partir du 11^e jusqu'au 14^e jr la croissance des plantes est pratiquement stable et ce pour toutes les variétés. Au bout du 14^e jr les variétés Flip 88-85, Flip 01-29, Flip 08-42, Flip 84-92, et Flip 93-93 ont atteint respectivement les hauteurs moyennes de 8,9cm, 9,2cm, 12,9cm, 13,4cm et 9,3cm avec en suivant un ordre décroissant Flip 84-92 qui possède la hauteur moyenne la plus élevée, suivi de Flip 08-42, ensuite de Flip 93-93, de Flip 01-29 et enfin de Flip 88-85.

Nous remarquons qu'au début de la culture, la hauteur des plants poursuivait leur processus de croissance pour enfin se stabiliser presque au niveau du 8^e jour en allant et cela s'explique par le fait que les hydrocarbures ont agi sur les variétés et ont inhibé leur croissance en hauteur.

L'ANOVA a révélé qu'il n'y a pas de différences significatives des variétés (p-value=0,40) ; donc la variété n'influence pas la hauteur des plants.

La croissance des plantes de la var.3 et var.4 est beaucoup plus importante que le reste et cela est dû peut être au fait que leurs caractéristiques génétiques ou physiologiques tolèrent beaucoup plus la pollution aux hydrocarbures plus que les autres.

D'après Chaineau *et al.* (2000) la hauteur des plantes diminue avec l'augmentation de la concentration en hydrocarbures. Cela est dû à la phytotoxicité des hydrocarbures qui inhibent, pour une longue période, le développement de la végétation.

I.3. Biomasse aérienne

La figure 11 représente la biomasse aérienne moyenne des var. de pois chiches.

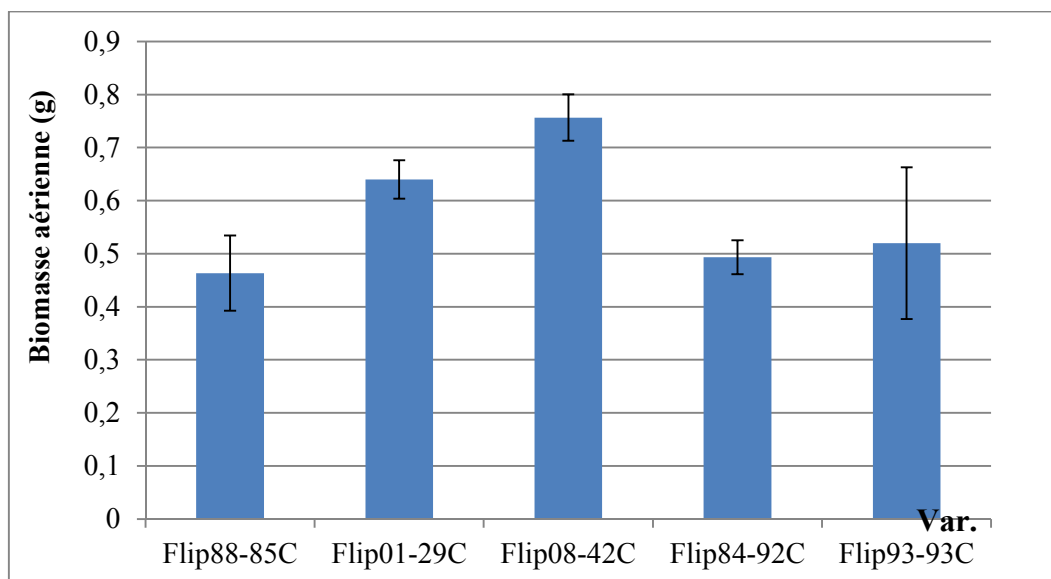


Figure 11 : Biomasse aérienne moyenne des var. de pois chiche

Les var. Flip 88-85, Flip 01-29, Flip 08-42, Flip 84-92 et Flip 93-93 présentent respectivement une biomasse aérienne de 0,46g, 0,64g, 0,76g, 0,49g et 0,52g avec Flip 08-42 présentant la plus haute résistance face à la pollution aux hydrocarbures.

L'analyse de la variance pour la biomasse aérienne des différentes variétés de pois chiches a montré avec une p-value=0,1918 qu'il n'y a pas de différence significative ; contrairement aux résultats de Lounes et Loutis, (2022) qui montrent pour le facteur variété qu'il y a une différence significative.

D'après nos résultats c'est la var.3 qui possède la biomasse aérienne la plus importante comparée aux autres.

I.4. Biomasse racinaire

La figure 12 représente la biomasse racinaire moyenne des var. de pois chiches.

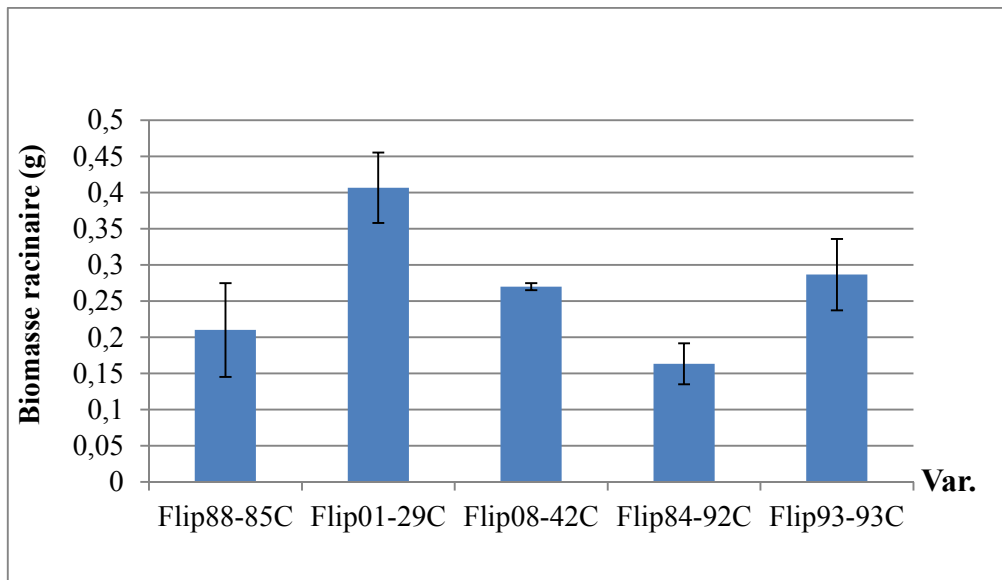


Figure 12 : Biomasse racinaire moyenne des var. de pois chiches

Nous remarquons d'après la figure que la var. Flip 01-29 présente une biomasse racinaire élevée (0,41g) par rapport aux 4 autres. Les hydrocarbures ont eu une influence sur les 4 var. à savoir Flip88-85, Flip 08-42, Flip 84-92, Flip 93-93 et qui a engendré une diminution de leurs biomasses racinaires qui sont respectivement de 0,21g, 0,27g, 0,16g et 0,29g.

L'ANOVA a donné une p-value égale à 0,06, ce qui veut dire qu'il n'y a pas de différence entre les variétés de pois chiches pour la biomasse racinaire. Cela a été confirmé par Lounes et Loutis, (2022).

D'après nos résultats c'est la var.2 qui possède la biomasse racinaire la plus importante comparée aux autres.

La biomasse racinaire de la var.4 est trop faible (0,16g) et cela peut être dû à l'effet des hydrocarbures sur la croissance des racines des pois chiches de celle-ci.

D'après Khan et *al.* (2012), il est admis en général que pour le nettoyage des sols pollués aux hydrocarbures, la plante doit avoir la capacité de tolérer de fortes concentrations de ces polluants et doit également posséder un vaste système racinaire. Plusieurs études ont été axées sur l'utilisation d'herbes en raison de leur système racinaire étendu, de la pénétration plus profonde de leurs racines dans le sol et de leur capacité à tolérer les hydrocarbures.

Selon Chaineau et *al.* (1997), l'effet toxique des hydrocarbures sur les racines des végétaux se traduit par un retard de la croissance et donc va entraîner une réduction du poids sec.

II. Evaluation de l'efficacité de la phytoremédiation

II.1. Test de germination

Pour évaluer la toxicité des hydrocarbures vis-à-vis du maïs, nous avons calculé le taux de germination des graines de maïs dans les sols traités par les différentes variétés de pois chiche et les résultats sont représentés par la figure 13.

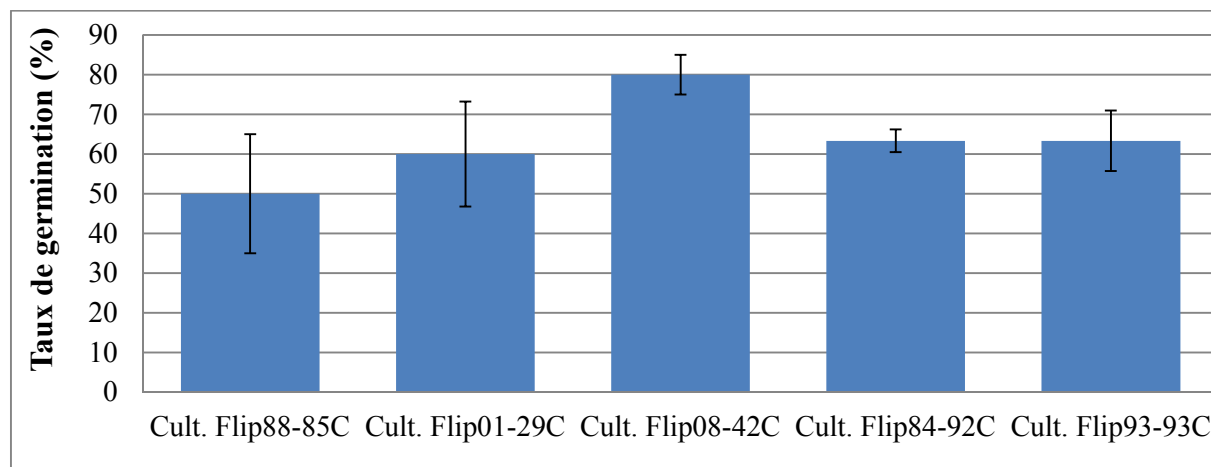


Figure 13 : Taux de germination des graines de maïs dans les sols cultivés.

En se basant sur la figure nous observons un taux de germination élevé (77%) du maïs dans le sol cultivé par la var.3 ou Flip 08-42 comparé au maïs cultivé par les autres variétés et le plus faible taux (50%) est observé dans le sol cultivé par la var.1 ou Flip88-85.

L'ANOVA a révélé qu'il n'y a pas de différence significative (p -value=0,504) entre les différentes variétés pour le taux de germination. La phytoremédiation a été une réussite et les hydrocarbures ont été dégradés par les variétés de pois chiches.

La var.3 a un grand potentiel phytoremédiateur par rapport aux autres variétés et cela est dû sûrement à son système racinaire qui doit être développé.

D'après nos résultats, il n'y a pas d'effet significatif des variétés sur le taux de germination du maïs et donc la germination du maïs. Les recherches de Lounes et Loutis (2022) confirment nos résultats à savoir une différence non significative pour le facteur variété.

Les carburants ont été dégradés par les plantes et le traitement par la phytoremédiation a été efficace. L'utilisation des plantes est efficace pour la dépollution du sol car elles sont capables de tolérer les hydrocarbures et de transformer les polluants organiques en une forme moins toxique (Khan et *al.*, 2012) et elles (les plantes) secrètent des exsudats racinaires qui stimulent la bioremédiation microbienne au niveau de la rhizosphère (Abdelly, 2007).

II.2. Longueur des racines

Les résultats de la mesure de la longueur des racines des graines du maïs dans les sols traités sont représentés par la figure 14.

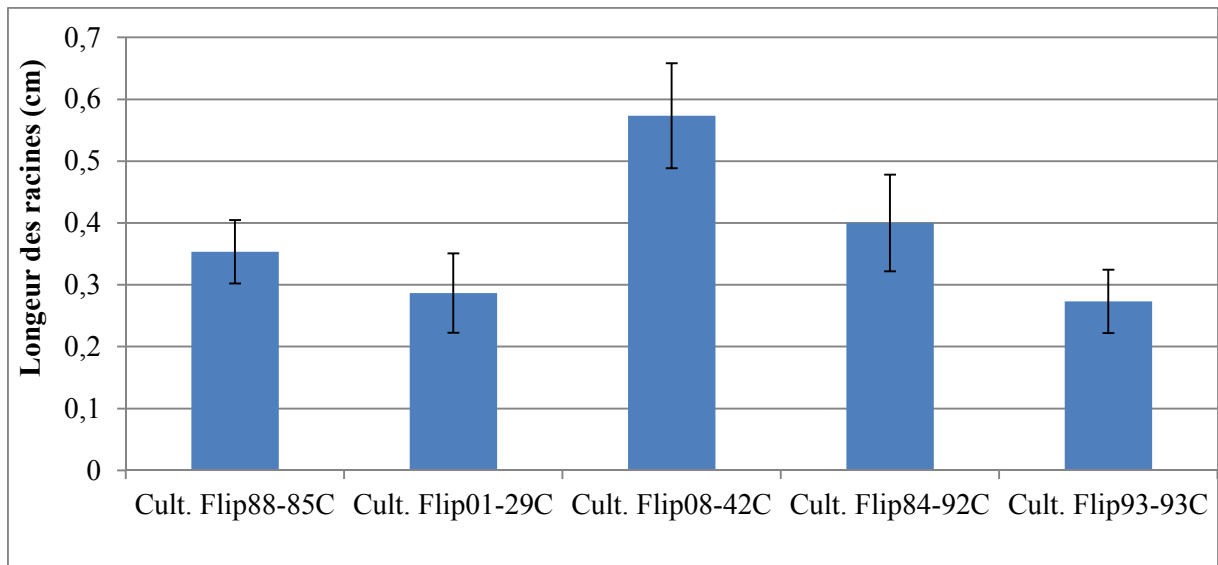


Figure 14 : Longueur des racines des graines de maïs dans les sols cultivés

Le graphe nous montre que la longueur des racines du maïs dans le sol cultivé par Flip 08-42 (0,57cm) dépasse les autres et la plus petite longueur (0,27cm) a été observée dans le sol cultivé par Flip 93-93. Les longueurs racinaires du maïs dans les sols cultivés par Flip 88-85, Flip 01-29, Flip 84-92 et Flip 93-93 possèdent respectivement les valeurs de 0,35cm, 0,28cm, 0,4cm, 0,27cm.

L'ANOVA pour la longueur des racines a révélé qu'il n'y a pas de différence significative ($p\text{-value}=0,06379$) entre les sols traités par phytoremédiation avec les différentes variétés de pois chiches.

D'après nos résultats c'est les racines du maïs dans le sol cultivé par la var.3 qui sont les plus longues. La croissance des racines est importante dans les sols traités par phytoremédiation avec les pois chiches et cette croissance est surtout remarquable dans le sol traité par phytoremédiation avec la var.3.

Selon Norini (2007), la diminution de la croissance 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 substance solubles. Cette atteinte des racines ne permet pas à la plante d'augmenter sa surface de contact avec le milieu de culture pour optimiser la nutrition minérale.

II.3. Survie et croissance des vers de terre

Les deux graphes ci-dessous (figures 15 et 16) représentent les variations dans le temps du poids des vers de terre et les variations de la mortalité des vers de terre dans le temps dans les différents sols.

II.3.1. Poids des vers de terre

La variation du poids des vers en fonction du temps est illustrée dans la figure 15.

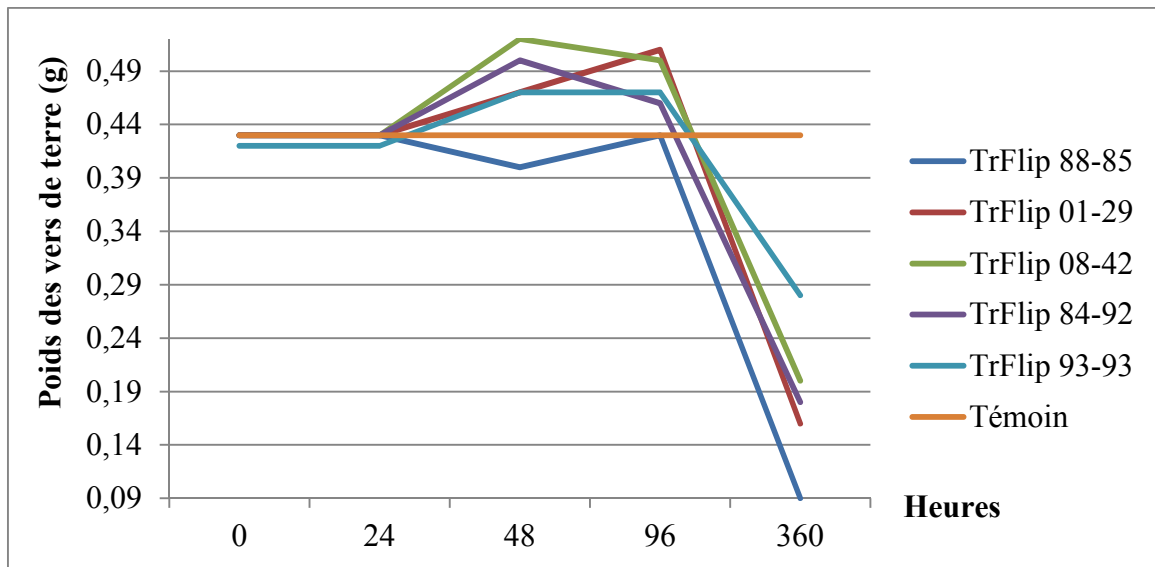


Figure 15 : Variation dans le temps du poids des vers de terre dans les différents sols

Pour le sol témoin, le poids des vers est resté stable et inchangé (même poids que le poids initial soit 0,43g).

Le poids des vers dans le sol TrFlip 88-85 a diminué (0,40g) au bout de 48h, pour ensuite croître légèrement et atteindre 0,43g au bout de 96h. 360h après (soit 15jrs après), une chute du poids des vers (0,09g) a été observée.

Dans le sol TrFlip 01-29, le poids des vers a augmenté jusqu'à atteindre une valeur de 0,51g au bout de 96h, puis par la suite de l'expérimentation (soit 15jrs après) une diminution du poids (0,16g) a été observé.

En ce qui concerne le poids des vers dans le sol TrFlip 08-42, il a augmenté (0,52g) au bout de 48h, ensuite il a chuté au bout de 96h puis continuer à chuter pour atteindre 0,2 g au bout de 360h.

Pour ce qui est du poids dans le sol TrFlip 84-92, le poids des vers était stable (0,43g) au début puis il a augmenté au bout de 48h (0,5g) pour ensuite chuter légèrement (0,46g) 96h après et fortement (0,18g) 360h après.

Le poids des vers dans le sol TrFlip 93-93 est stable (0,42g) au début de l'expérimentation, puis il a augmenté (0,47g) mais toujours stable à partir de 48 à 96h ; et par la suite (soit au bout de 360h) une diminution du poids des vers a été constatée (0,28g).

Le test de Kruskal-Wallis révèle qu'il n'y a pas de différence significative avec une $P=0,5522$; et donc les hydrocarbures dans les sols et le temps n'ont pas d'effet sur le poids du vers *Eisenia* ; comme ceci a été constaté avec les résultats obtenus par Pizl et al. (2007) in Ghides et Imarazene, (2017).

II.3.2. Mortalité des vers de terre

La figure 16 représente la variation dans le temps du taux de mortalité des vers dans les différents sols

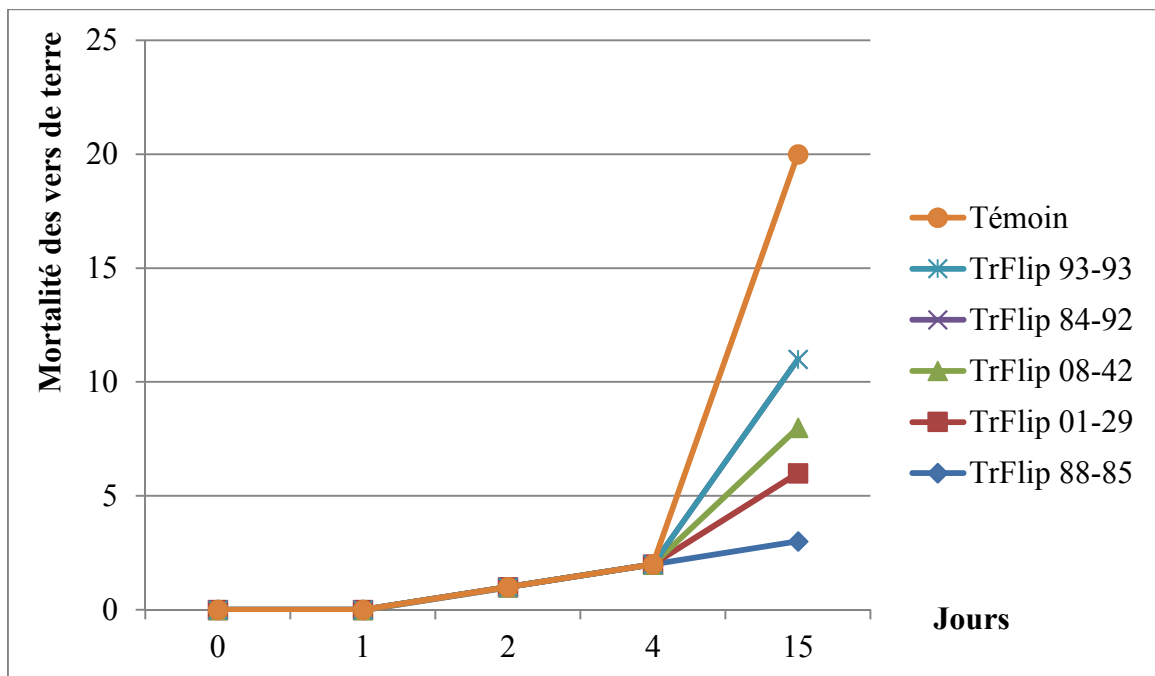


Figure 16: Variation dans le temps du taux de mortalité des vers dans les différents sols

La variation du taux de mortalité déterminée en fonction du nombre des vers morts est représentée dans la figure 16.

Le taux de mortalité est nul dans le sol témoin et ce jusqu'au jour 4 mais après nous constatons une mort brusque et totale de tous les vers au niveau du jour 15.

Au niveau des sols TrFlip 01-29, TrFlip 08-42 et TrFlip 84-92, le taux de mortalité des vers est nul depuis le début de l'expérimentation jusqu'au jour 4 ; mais au bout du jour 15 nous avons remarqué la mort de 3 individus dans les sols TrFlip 01-29 et TrFlip 84-92 et la mort de 2 individus dans le sol TrFlip 08-42.

Dans les sols TrFlip 88-85, c'est au bout de 2jrs en allant que nous avons constaté une mortalité des vers. Au jour 2, il y a 1 seul individus mort ; au jour 4, 2 individus sont morts et au bout de 15jrs 3 vers sont morts.

Nous constatons durant toute la durée de l'expérimentation une absence de mortalité des vers dans le sol TrFlip 93-93C.

Le test de Kruskal-Wallis a montré qu'il n'y a pas de différence significative ($P=0,3272$) ; donc plus le temps avance plus nous remarquons que le temps et les carburants influent sur la mortalité des vers de terre.

D'après Vasseur et al. (2008) un sol pollué par des hydrocarbures a des effets toxiques et induirait la mortalité des vers de terre.

D'après nos résultats le taux de mortalité des vers de terre dans les sols pollués croît au fur et à mesure que les jours passent et cela est dû aux hydrocarbures contenus dans le sol. Selon Brown *et al.* (2004) le taux de mortalité des vers de terre tend à augmenter dans les sols contaminés par les hydrocarbures, tels le pyrène et tel le phénanthrène ou le diesel pour Shin et Kim (2001). Ces derniers pensent que la présence d'un seul HAP dans le sol aurait à court terme un effet plus toxique sur les vers de terre et Salanitro *et al.* (1997) in Gherbi N. et Meziane K., (2019); Dorn *et al.* (1998) in Gherbi N. et Meziane K., (2019) pensent que les mélanges d'hydrocarbures contenant plus de HAP seraient moins toxiques pour les vers que ceux qui contiennent moins de HAP. Compte tenu de tout ceci nous dirons alors que la toxicité des hydrocarbures sur les vers de terre dépend de son type et de sa composition. Contrairement à nos résultats obtenus, les travaux réalisés par Ghides et Imarazene (2017) montrent que le temps n'a pas d'effet sur la mortalité.

III. Activité biologique globale

Les résultats de l'activité biologique globale du sol exprimée en quantité de CO₂ dégagé par la respiration microbienne du sol sont représentés dans la figure 17.

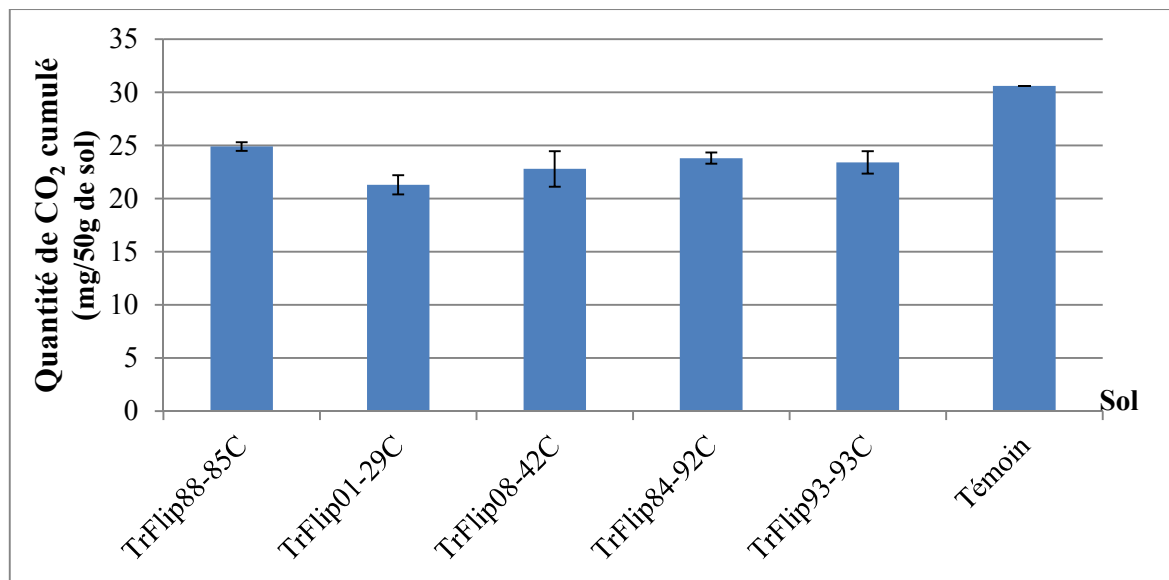


Figure 17 : Dégagement de CO₂ après 7jrs d'incubation dans les sols traités et témoin.

D'après la figure, nous constatons que la quantité de CO₂ dégagée dans le sol témoin (30,6mg/50g de sol) est plus élevée que celle dégagée dans les autres sols traités avec les 05 variétés.

Pour Duchaufour, (2001) les effets des hydrocarbures sur cette activité biologique du sol dépendent de leur nature, leur concentration dans le sol et d'autres facteurs liés au milieu.

L'ANOVA a révélé pour la quantité de CO₂ dégagée qu'il n'y a pas de différences significatives entre les sols traités par chacune des variétés et le sol témoin (non cultivé).

Nous concernant, nos résultats montrent que le dégagement de CO_2 est plus important dans le sol traité par la variété 1 (TrFlip88-85C).

D'après nos résultats le facteur variété n'a pas d'effet sur la quantité de CO_2 dégagée contrairement à Lounes et Loutis (2022) qui trouvent que la variété exerce un effet sur le dégagement de CO_2 .

La respiration est la plus commune et ancienne mesure indirecte de l'activité microbienne globale dans les sols (Prosser, 1997).

Les légumineuses grâce à leur système racinaire bien développé, possèdent une capacité de décontamination importante et ce dernier induirait des changements des propriétés physico-chimiques et biologiques du sol qui va de ce fait permettre l'amélioration de l'environnement microbien et un développement normal de la végétation (Gherbi et Meziane, 2019). La plante fournit les nutriments par les exsudats racinaires, et souvent de l'oxygène pour les populations microbiennes de la rhizosphère. Ce qui accroîtra pour la plante et les microorganismes la biodisponibilité des contaminants selon Tane et Kinako (2007). Et cela permet d'augmenter le dégagement de CO_2 .

IV. Activité enzymatique du sol

L'impact de la pollution par les hydrocarbures sur cette activité est représenté dans la figure 18. Le graphe ci-dessous montre que la quantité de H_2O_2 transformée en O_2 est de 1,174 mol dans les sols traités par Flip 88-85 et Flip 01-29, ce qui est supérieur à celle du sol témoin qui a une valeur moyenne de 1,136 mol. La quantité de H_2O_2 transformée en O_2 et qui a donné une valeur moyenne de 1,136 mol dans le sol témoin est inférieure et moindre par rapport à la valeur 1,155 mol dans les sols traités par Flip 08-42 Flip 84-92 et Flip 93-93.

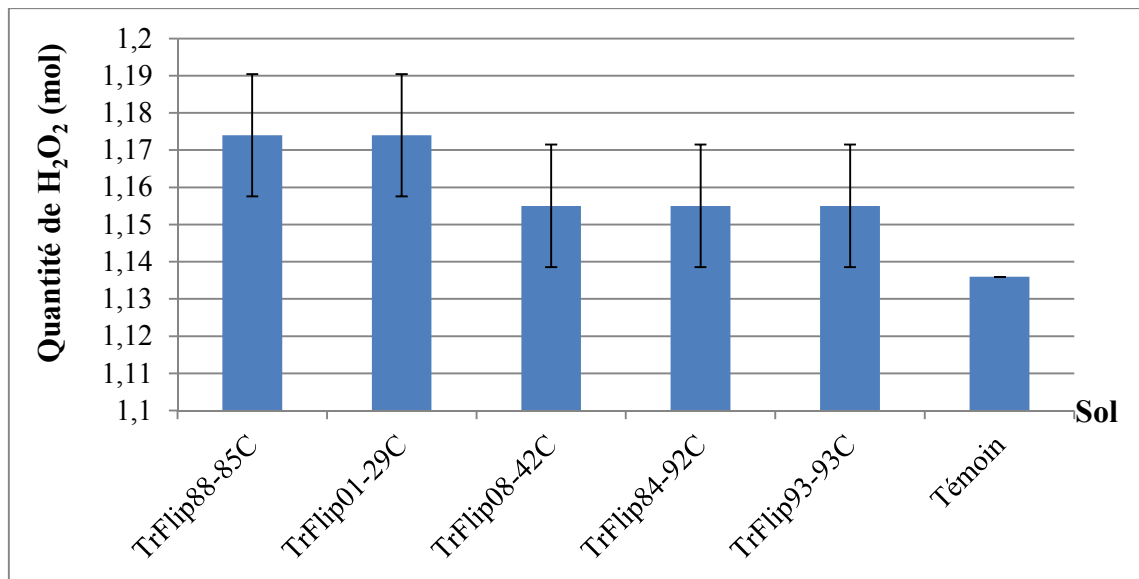


Figure 18 Activité de la catalase dans les sols traités et témoin.

Le test de Kruskal-Wallis a montré qu'il n'y a pas de différences significatives ($P=0,82$) pour l'activité de la catalase entre les différentes variétés.

Selon nos graphes les différences entre les 05 variétés ne sont pas significatives en ce qui concerne l'activité enzymatique pour les différents sols à savoir le sol témoin et les sols traités par les variétés de pois chiches contrairement à Lounes et Loutis (2022) qui a trouvé une différence très hautement significative pour le facteur variété.

Conclusion et perspectives

Au cours de ce travail, nous avons procédé à un essai de phytoremédiation au laboratoire du sol de la station-service de Boukhalfa pollué aux hydrocarbures en utilisant 05 variétés de pois chiches (*Cicer arietinum* L.) à savoir Ain zada (Ghab05) ou Flip 88-85C (Var.1), Makerra ou Flip 01-29C (Var.2), El Ogbane ou Flip 08-42C (Var.3), Béni chograne ou Flip 84-92C (Var.4) et Oued rhumel (Ghab 04) ou Flip 93-93C (Var.5).

D'après les résultats obtenus au cours de ce travail nous pouvons conclure que le taux de levée des variétés est élevé malgré la pollution. Nos résultats montrent aussi une biomasse végétale faible ; mais parmi toutes les variétés c'est la variété 3 Flip 08-42 ou el ogbane qui possède la biomasse aérienne la plus élevée. Nos résultats montrent également qu'au niveau du test de germination et de la longueur des racines, c'est toujours dans le sol cultivé par la variété 3 ou Flip08-42 qu'il y a la plus haute longueur des racines et une germination importante. D'après nos résultats, les hydrocarbures causent une mortalité importante et une diminution du poids chez les vers de terre.

Au regard de ces résultats, nous constatons que la toxicité des hydrocarbures a baissé dans les sols traités par les 05 variétés de pois chiche et la qualité de ces sols a été, de ce fait, améliorée. Les résultats spectaculaires ont été observés chez la variété 3 Flip08-42 ou el ogbane ; elle a un pouvoir de décontaminateur élevé par rapport aux autres. Cela nous permet alors de conclure quant à l'efficacité de la variété 3 El Ogbane ou Flip 08-42C dans la dépollution du sol pollué par les hydrocarbures. La variété 3 El Ogbane ou Flip 08-42C possède donc un pouvoir de décontaminateur élevé et peut donc être utilisée dans la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures.

Nous proposons enfin quelques perspectives de recherche :

- Réaliser la phytoremédiation en la combinant avec la bio stimulation ;
- Réaliser la technique de phytoremédiation mais cette fois ci une phytoremédiation in-situ et comparer les résultats obtenus avec ceux de la phytoremédiation faite au laboratoire ;
- Réaliser une phytoremédiation des eaux usées ;
- Réaliser la phytoremédiation avec des plantes ornementales.

Résumé

Le présent travail a été mené afin d'essayer de décontaminer un sol pollué par les hydrocarbures par la phytoremédiation en utilisant 5 variétés de pois chiches ; également à évaluer l'efficacité de cette technique et aussi à tester et comparer l'efficacité de ces 05 variétés de pois chiches dans la décontamination de ce sol pollué.

En effet, sur la base des résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'effet des hydrocarbures sur le végétal a provoqué une biomasse végétale faible, un important taux de levée. Les résultats ont montré aussi une mortalité importante et une diminution du poids chez les vers de terre.

Enfin nous concluons que la variété 3 (El ogbane ou Flip 08-42C) résiste plus à la pollution et a été efficace dans la décontamination du sol; et donc elle possède un bon potentiel phytoremédiateur du sol pollué par les hydrocarbures.

Les mots clés : Phytoremédiation, sol, hydrocarbures, pollution, *Cicer arietinum* L., Ain zada (Ghab05) ou Flip88-85C, Makerra ou Flip01-29C, El Ogbane ou Flip08-42C, Béni chograne ou Flip84-92C, Oued rhumel (Ghab 04) ou Flip93-93C et *Zea mays* L.

Abstract

The present work was conducted to try to decontaminate a soil polluted by hydrocarbons by phytoremediation using 5 varieties of chickpeas; also to evaluate the effectiveness of this technique and also to test and compare the effectiveness of these 05 varieties of chickpeas in the decontamination of this polluted soil.

Indeed, on the basis of the obtained results, we can conclude that the effect of hydrocarbons on the plant caused a low plant biomass, an important emergence rate. The results also showed an important mortality and a decrease of the weight in earthworms.

Finally we conclude that variety 3 (El ogbane or Flip 08-42C) is more resistant to pollution and was effective in soil decontamination; and therefore it has a good phytoremediator potential of hydrocarbon polluted soil.

Key words: Phytoremediation, soil, hydrocarbons, pollution, *Cicer arietinum* L., Ain zada (Ghab05) or Flip88-85C, Makerra or Flip01-29C, El Ogbane or Flip08-42C, Béni chograne or Flip84-92C, Oued rhumel (Ghab 04) or Flip93-93C and *Zea mays* L.

Références bibliographiques

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Taux de levée des plantes des différentes variétés de pois chiches

Variétés \ Sol pollué	Flip 88-85	Flip 01-29	Flip 08-42	Flip 84-92	Flip 93-93
R1	100%	100%	100%	100%	100%
R2	40%	80%	100%	100%	100%
R3	80%	100%	100%	100%	40%

Kruskal-Wallis rank sum test

data: levée by Variété

Kruskal-Wallis chi-squared = 4.4043, df = 4, p-value = 0.354

Annexe 2 : Hauteur moyenne des plants des variétés de pois chiches

Durée (jr) \ Sol pollué	5 ^{ème} jr	8 ^{ème} jr	11 ^{ème} jr	14 ^{ème} jr
Flip 88-85	2,5	8,4	8,9	8,9
Flip 01-29	4,4	9	9,2	9,2
Flip 08-42	5,5	12,5	12,7	12,9
Flip 84-92	6,0	13,1	13,4	13,4
Flip 93-93	5,6	9,1	9,3	9,3

Annexe 3 Biomasse aérienne des 5 var. de pois chiches cultivées dans le sol pollué

Sol \ Biomasse aérienne	Flip 88-85	Flip 01-29	Flip 08-42	Flip 84-92	Flip 93-93
R1	0,54	0,70	0,83	0,52	0,79
R2	0,30	0,56	0,78	0,54	0,55
R3	0,55	0,66	0,66	0,42	0,22

Annexe 4 Biomasse racinaire des 5 var. de pois chiches cultivées dans le sol pollué

Sol	Flip 88-85	Flip 01-29	Flip 08-42	Flip 84-92	Flip 93-93
Biomasse racinaire					
R1	0,28	0,49	0,26	0,21	0,40
R2	0,06	0,43	0,27	0,18	0,22
R3	0,29	0,30	0,28	0,10	0,24

Annexe 5 Taux de germination des graines de maïs dans les sols traités et témoins

Sols traités				
TrFlip 88-85	TrFlip 01-29	TrFlip 08-42	TrFlip 84-92	TrFlip 93-93
50%	60%	76,67%	63,33%	63,33%

Annexe 6 Longueur des racines des graines de maïs dans les différents sols

Sols traités				
TrFlip 88-85	TrFlip 01-29	TrFlip 08-42	TrFlip 84-92	TrFlip 93-93
0,35	0,29	0,57	0,4	0,27

Annexe 7 Variation du poids des vers de terre dans les différents types de sols

Temps	0	24h	48h	96h	360h
Sols					
Témoin	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
TrFlip 88-85	0,43	0,43	0,4	0,43	0,09
TrFlip 01-29	0,43	0,43	0,47	0,51	0,16
TrFlip 08-42	0,43	0,43	0,52	0,5	0,2
TrFlip 84-92	0,43	0,43	0,5	0,46	0,18
TrFlip 93-93	0,42	0,42	0,47	0,47	0,28

Annexe 8 Variation de la mortalité des vers de terre dans les différents sols

Temps	0	1jr	2jrs	4jrs	15jrs
Sols					
Témoin	0	0	0	0	9
TrFlip 88-85	0	0	1	2	3
TrFlip 01-29	0	0	0	0	3
TrFlip 08-42	0	0	0	0	2
TrFlip 84-92	0	0	0	0	3
TrFlip 93-93	0	0	0	0	0

Annexe 9 Activité biologique du sol

Sol	Quantité de CO₂ dégagé
TrFlip 88-85	8,3/24,9
TrFlip 01-29	7,1/21,3
TrFlip 08-42	7,6/22,8
TrFlip 84-92	7,93/23,8
TrFlip 93-93	7,8/23,4
Témoin	10,2/30,6

Annexe 10 Activité enzymatique (catalase)

Sols	Volume de KMnO₄ titré (ml)
TrFlip 88-85	0,174
TrFlip 01-29	0,174
TrFlip 08-42	0,155
TrFlip 84-92	0,155
TrFlip 93-93	0,155
Témoin	0,136

Références bibliographiques

- 1) **Abdelly C.** Bioremédiation/Phytoremédiation. Université de Tunis. Institut Supérieur de l'Education et de la Formation Continue. Département des Sciences Naturelles, 2007, 31p
- 2) **ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie ;**
<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=10157;29/03/10>.
- 3) **Admin (discussion contributions).** Les hydrocarbures. 20 Aout 2014. 20 Juillet 2016 sur https://wiki.aurea.eu/index.php/les_hydrocarbures
- 4) **Alchimia,** 2016. La phytoremédiation : du Cannabis pour nettoyer les sols. Blog Growshop Alchimia. URL <https://www.alchimiaweb.com/blogfr/phytoremediation-cannabis-nettoyer-sols-contamines>
- 5) **Ali Ahmed S. 2011.** Essai de réhabilitation d'un sol contaminé par les hydrocarbures à l'aide de tensioactifs obtenue par voie biologique. Thèse de Magistère, école nationale supérieure agronomique, 99p.
- 6) **Amri M., Niane A. A., Kumar S. and Kemal S. (2019),** Principales activités des programmes d'amélioration génétique de la lentille et du pois chiche Kabuli à ICARDA, Innovations Agronomiques 74, pp : 15-24
- 7) **Amri-Tiliouine W.** Introduction de la variabilité génétique par radio-mutagenèse (rayons gamma) chez le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) et évaluation agronomique et génétique (Low-Cost TILLING) de mutants en M₂. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. ENSA – El Harrach - Alger, 2020, 93p
- 8) **Belaid F. Z. et Abdi S.** Phytoremédiation des sols pollués par les hydrocarbures en utilisant *Phaseolus vulgaris* L., *Hordeum vulgare* L., *Triticum durum* L. à l'ITMA. Mémoire de Master. Biodiversité et environnement-Ecologie et environnement. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2021, 36p.
- 9) **Ben Khirfa I.** Contribution à l'étude de la biodégradation des hydrocarbures par le processus de la phytoremédiation. Microbiologie Appliquée. Université Mohamed Khider de Biskra, 2020, 78p
- 10) **Bert V., Deram A. (1999),** Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds, France, Environnement et Développement alternatif.
- 11) **Bocard C.** Marées noires et sols pollués par des hydrocarbures : enjeux environnementaux et traitement des pollutions. Editions Technip. Paris, 2006, 295p.
- 12) **Bourkache R. et Bousenou N.** Essai de phytoremédiation in-situ et ex-situ d'un sol pollué par les hydrocarbures. Cas des stations-services. Mémoire de Master. Protection de l'environnement. UMMTO, 2015, 39p.
- 13) **BRGM (2005) - A. Saada, C. Nowak, R. Chartier et N. Coquereau.** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures - Rapport intermédiaire : résultat de la phase 1. Rapport BRGM/RP-53739-FR, 107 p
- 14) **BRGM (2006) - A. Saada, C. Nowak, R. Chartier et N. Coquereau.** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures - Rapport final. Rapport BRGM/RP-54183-FR, 99 p

- 15) **Brown, P.J., Long, S.M.,** Spurgeon, D.J., Svendsen, C et Hankard, P.K. (2004). Toxicological and biochemical responses of the earthworm *lumbricus rebellus* to pyrene, a non-carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon. *Chemosphere* 57(11) p. 1675-1681.
- 16) **CEAEQ (Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec).** 2015. Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale – Etudes Genv222 et Genv23, Evaluation environnementale stratégique globale sur les hydrocarbures. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 41 p. et annexes.
- 17) **Chaîneau C. H., Morel J. L. and Oudot J.,** (1996), Land Treatment of Oil-Based Drill Cuttings in an Agricultural Soil, *J. Environ. Qual.* 25, pp. 858-867
- 18) **Chaîneau C. H., Morel J.L. and Oudot J.,** (1997), Phytotoxicity and Plant Uptake of Fuel Oil Hydrocarbons, *J. Environ. Qual.* N°26, pp. 1478-1483
- 19) **Chennafi H.** (2019), Chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) tested for their productivity in rainfed conditions, *Revue Agriculture.* 10(2), pp : 68-76
- 20) **Chocat B., 2004).** Pollution par les hydrocarbures dans les eaux de ruissellement et traitabilité : solutions existantes 1ere édition Tec et Doc Lavoisier. pp 289-290.
- 21) **COLIN F.** Pollution localisée des sols et des sous- sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Académie Des Sciences. . Editions TEC et DOC. Paris, 2000, 416p. (sur le net)
- 22) **Cunningham S. D. and Berti W. R.** (1993) *In Vitro Cell Dev. Biol.* 29, pp. 207-212
- 23) **Cunningham S. D. and Berti W. R.,** (1995), Phytoremediation of contaminated soils, *Trends in Biotechnology* 13, pp. 393-397.
- 24) **Cunningham S. D., Berti W. R. and Huang J. W.,** (1995), Phytoremediation of contaminated soils, *Trends in Biotechnology* Vol 13, pp. 393-397.
- 25) **Dahmane K. et Lakhdari Y.** Contribution à l'évaluation de l'incidence d'Ascochyta rabieisur les caractères phénologiques et les composantes de rendement des principaux génotypes de *Cicer arietinum* L. cultivés en Algérie. Mémoire de Master. Interaction plantes-pathogènes et protection des plantes. Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA), 2020, 64p.
- 26) **David C.,** INRS, département Expertise et conseil technique, prévention des risques biologiques, ND 2372 – 230, (2013), 16p
- 27) **Dechamp C., Meerts P.** (2003), « La phytoremédiation : Panacée pour l'environnement ou menace pour la biodiversité ? », *Les Naturalistes belges*, n°82, pp. 135-148.
- 28) **Delage P., Schrefler B., 2005** Géomécanique environnementale : sols pollués et déchets. Lavoisier. 249p.
- 29) **DRUART P., HUSSON C., PAUL R.** Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation : utilisation d'écotypes ligneux de ripisylves pour l'ingénierie végétale. Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2013, 155p
- 30) **Duchaufour P.,** 2001 : Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement. 6^{ème} édition MASSON, Paris Milan Barcelone. 498p.
- 31) **Fattal P.** Pollution des côtes par les hydrocarbures. Presses universitaires de Rennes, 2008, 395p

- 32) **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'État en biologie U.M.M.T.O. 73p
- 33) **Fingas M.** Oil Spill Science and Technology. 1st édition. Gulf professional publishing. USA, 2011, 1192p
- 34) **Gabet S.** Remobilisation d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l'aide d'un tensioactif d'origine biologique. Thèse de doctorat en Chimie et Microbiologie de l'Eau. Université de Limoges, 2004, 131p
- 35) **Galleo J.L.R.,** Loredó J., Llamas J.F., Vazquez F., Sanchez J. (2001). Bioremediation of diesel-contaminated soils : Evaluation of potential *in situ* techniques by study of bacterial degradation *Biodegradation* 12 :325-335.
- 36) **Gemeda A. D., Fikre A., and Gurmu G. N.,** (2020), Genetic Variability of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Genotypes under Irrigation of Middle Awash, Ethiopia, International Journal of Agriculture and Biosciences, 9(4), pp : 178-183.
- 37) **Geo.** Hydrocarbure : définition, classification et utilisation. 2018. Mis à jour en 2020 sur <https://www.geo.fr/environnement/hydrocarbure-definition-classification-et-utilisation-193625>
- 38) **Gherbi N. et Meziane K.** 2019. Comparaison des techniques biologiques de décontamination d'un sol pollué aux carburants par le biais de bio-essais. Mémoire de Master. Ecologie et Environnement-Biodiversité et Environnement. UMMTO, 39p
- 39) **Ghides N. et Imarazene R.** Contribution à l'étude de l'effet des hydrocarbures (gasoil, essence super) sur la croissance des vers de terre et les caractéristiques du sol. Protection de l'environnement. UMMTO, 2017, 41p.
- 40) **Girard M. C., Walter C., Rémy J. C., Berthelin J., Morel J. L.,** 2005, Sols et environnement. Edition Dunod Paris (France). 529p
- 41) **Gouhier V.** Résilience des écosystèmes après un déversement d'hydrocarbures. Essai de maîtrise professionnelle en biogéosciences de l'environnement pour l'obtention du grade de maître en sciences (M. Sc.), Québec, 2014, 107p
- 42) **Guignard J. L.,** 1980. Abrégé de botanique. 4^{ème} ed. Masson, Paris. 259p
- 43) **Hanna K.** Etude de faisabilité de l'utilisation de molécules "cage" dans la dépollution des sols : Solubilisation et extraction de polluants organiques par les cyclodextrines. Sciences et techniques du déchet. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004, 236p
- 44) **Hartman M. T., Flocker W. J., Kofranek A. M.** Plant science : growth, development, and utilization of cultivated plants. New Jersey : Prentice-Hall, 1981 ; 676p.
- 45) **Hiema S. C.** Caractérisation et classification de lignées de maïs (*Zea mays* L.). Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur du Développement Rural. Agronomie. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 2005, 67p
- 46) **ICARDA, INRAA, ITGC.** (2005). Algeria and ICARDA. Twenty-Five Years of Collaboration, P.O. Box 5466, Aleppo, Syria. pp : 1-18 sur <https://mel.cgiar.org/reporting/download/hash/PfYCugN1>
- 47) **INRA.** 2009. <http://taste.versailles.inra.fr/inapg/phytoremed/eco/index.htm> [28 juillet 2009]

- 48) **ITGC, 2011.** La lentille et le pois chiche pour une conduite mécanisée. ITGC, Algérie ; 29p
- 49) **ITGC, 2013.** La culture du pois chiche (*Cicer arietinum* L.). ITGC, Algérie, 5p.
- 50) **ITG C, 2018,** La culture du pois chiche en Algérie, El-Harrach, Alger, 24p sur <https://fr.scribd.com/document/422172854/Brochure-Pois-Chiche-Finale-2018-ITGC>
- 51) **Jumeau S.,** (1999), Devenir de la contamination en hydrocarbures lors de la mise en dépôt des produits de draguage. Rapport de DEA Sciences et Techniques de l'Environnement, Université Paris XII-Val de Marne.
- 52) **Khan S., Afzal M., Iqbal S., Kha Q.M.,** (2013) : Plant-bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere*. Vol.90. pp : 1317-1332.
- 53) **Kebaili Z.** Effet conjugué de la pulvérisation de la Kinétine et l'AIA Sur la phénologie et la physiologie du système végétatif Chez quelques variétés du pois chiche (*Cicer arietinum* L.). Mémoire de Magister. Ecophysiologie végétale en zone semi-aride. Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi, 2008, 97p.
- 54) **Kirpichtchikova T.** Phytoremédiation par Jardins Filtrants d'un sol pollué par des métaux lourds : Approche de la phytoremédiation dans des casiers végétalisés par des plantes de milieux humides et étude des mécanismes de remobilisation/immobilisation du zinc et du cuivre. Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement. Université Joseph-Fourier – Grenoble I, 2009, 213p
- 55) **Koller E.** Traitement des pollutions industrielles (Eau, air, déchets, sols, boues), 2^e édition Dunod. Paris, 2009, 570p
- 56) **Kupicha F. K.,** (1977), The delimitation of tribe Viciae (Leguminosae) and the relationships of *Cicer* L. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 74 : 131-162
- 57) **Lemière B., Seguin J. J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph., Darmendrail D., Conil P.** (2001) – Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'Évaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau. BRGM/RP-50662-FR, 103p., 20 fig., 9 tabl., 5 ann.
- 58) **Lounes Y. et Loutis M. 2022.** Etude de l'efficacité des variétés de légumineuses (fève et haricot) dans la décontamination d'un sol pollué aux hydrocarbures par phytoremédiation. Mémoire de Master. UMMTO, 34p.
- 59) **Marchal R., Penet S., Solano S.F., Vandecasteele J.P.,** (2003), Gasoline and Diesel Oil Biodegradation, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 58, No. 4, pp. 441-448
- 60) **Matsodoum Nguemte P.** Phytoremédiation des sols pollués par les hydrocarbures : Inventaires floristiques, évaluation des performances des espèces végétales et modélisation du transfert sol-plante des HAP. Thèse en cotutelle pour obtenir le grade de Docteur. Biotechnologies Végétales - Phytoremédiation. Université de Strasbourg ; Université de Yaoundé I, 2019, 228p
- 61) **Messou A., Coulibaly L., Dombia L., Gourene G.,** (2013). Plants diversity and phytoaccumulators identification on the Akouedo landfill (Abidjan, Côte d'Ivoire). *Afr. J. Biotechnol.* 12.
- 62) **Militon Cécile.** Caractérisation des communautés procaryotiques impliquées dans la bioremédiation d'un sol pollué par des hydrocarbures et développement d'outils

d'analyse à haut débit : Les biopuces ADN. Génomique et écologie microbienne.
Université Blaise Pascal-Université d'Auvergne, 2007, 176p

- 63) **Muratova A, Turkovskaya O. V., Hubner T., Kuschik P. (2003)**. Studies of the Efficacy of Alfalfa and Reed in the Phytoremediation of Hydrocarbon Polluted Soil. *Applied Biochemistry and Microbiology*, Vol.39, NO.6, pp. 599-605.
- 64) **Nait A. S., Djenad M.** Essai de remédiation d'un sol pollué aux hydrocarbures par biostimulation Cas des stations-service. *Protection de l'Environnement*. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015, 29p
- 65) **Nassif A. M., Malhotra R. S., Singh K.B., and Khalaf G. (2005)**, Registration of 'Ghab 5' – A Kabuli Chickpea Cultivar, *Crop Science*, Vol. 45(6), pp : 2652-2652 sur <https://www.thefreelibrary.com/Registration+of%27Ghab+5%27--a+Kabuli+chickpea+cultivar-a0138996483>
- 66) **Neff J. M., Ostazeski S., Gardiner W. and Stejskal I.**, (2000), Effects of weathering on the toxicity of three offshore Australian crude oils and a diesel fuel to marine animals, *Environmental Toxicology and Chemistry*. Vol. 19. No. 7. pp. 1809-1821.
- 67) **Norini M-P.** Ecodynamique des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des communautés microbiennes dans des sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique : Influence de la rhizosphère et de la mycorhization. Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I en Géosciences, 2007, 197p
- 68) **Oultaf L.**, 2015 : Etude comparative de l'efficacité de trois techniques de remédiation (phytoremédiation, biostimulation, bioaugmentation) sur des sols pollués par les carburants. Mémoire de Magister. UMMTO. 90p.
- 69) **Patej S.** (2002). Etude de scénarios dangereux en stations-services. Rapport final de l'INERIS DRA- 40862, 38p
- 70) **Pernot A.** (2012). « Soil structure and organic matter repartition as controlling factors of PAH-type compounds availability in a former industrial soil ». *LES Sols et Environnement de Nancy*, UMR 1120 Université de Lorraine
- 71) **Philogène B. J. R., et Arnason J. T.**, (1995), La résistance du maïs aux insectes phytophages : une question de molécules, *Cahiers Agricultures* 4, pp : 85-90 sur <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/download/29874/29634/0>
- 72) **Piedrafita C., Maria-Victoria.** La pollution ponctuelle des sols : Le cas des stations-services dans la région de Bruxelles-Capitale. *Gestion de l'Environnement*. Université Libre de Bruxelles, 2007, 115p
- 73) **Pilon-Smits E.** (2005) : Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, Vol. 56. P : 15-39
- 74) **Prince R. C., Garrett R. M., Bare R. E., Grossman M. J., Townsend T., Suflita J. M., Lee K., Owens E. H., Sergy G. A., Braddock J. F., Lindstrom J. E., Lessard R. R.**, (2003), The roles of phytooxidation and biodegradation in long-term weathering of crude and heavy fuel oils, *Spill Science & Technology Bulletin* Vol.8, No.2, pp : 145-156
- 75) **Ramade F.**, (2007). Introduction à l'écotoxicologie. Fondements et applications. Edition TEC et DOC. Lavoisier. 618p.

- 76) **Raskin I., Kumar N. P. B. A., Dushenkov S., and Salt D. E.,** (1994b) Bioconcentration of heavy metals by plants, *Current Opinion in Biotechnology* N°5, pp. 285-290.
- 77) **Rezai M., Shabani A., Nakhjavan S. and Zebarjadi A.,** (2015), Screening Drought-Tolerant Genotypes in Chickpea using Stress Tolerance Score (STS) Method, *Int J. Adv. Biol. Biom. Res.*, 3(1), pp. 119-128
- 78) **Rivière Jean-Louis.** Evaluation du risque écologique des sols pollués. Paris : Tec et Doc, 1998, 228p.
- 79) **Rocher V. et Moilleron R.,** (2003). Identification des sources d'hydrocarbures en milieu urbain : approche automatisée. Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Eau, la Ville et l'Environnement, Université Paris XII-Val de Marne, Créteil
- 80) **Rouanet G.** Le maïs. Paris : ACCT, 1984 ; 142p
- 81) **Rouquerol T., Amir H., Amir A.** (1987). Effet de l'épandage de résidus pétroliers de raffinerie sur l'évolution de la matière organique. L'activité de la densité microbienne d'un sol agricole, *Revue d'écologie et de biologie du sol*, 156p
- 82) **Sabaghpour H ; Naseri M. ; Afzali F.,** (2004), Comparison yield of new chickpea promising line FLIP 9393 versus local chickpea variety, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research Center, 15p sur <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IR2007000425>
- 83) **San Miguel A.** (2011). Phytoremédiation des organochlorés. Etude mécanistique et fonctionnelle des capacités épuratrices du système plante-rhizosphère. Modèles, Méthodes et Algorithmes en biologie, santé et environnement (MBS). Université de Grenoble, 2011, 203p.
- 84) **Shin, K. H. et Kim, K. W.** (2001). Ecotoxicity Monitoring of Hydrocarbon-Contaminated Soil using Earthworm (*Eisenia foetida*). *Environmental Monitoring and Assessment* 70(1) p.93-103.
- 85) **Shirdam R., Zand A. D., Bidhendi G. N. et Mehrdadi N.** « Phytoremediation of Hydrocarbon-Contaminated Soils with Emphasis on the Effect of Petroleum Hydrocarbon on the growth of Plant Species,» *Phytoprotection*, Vol. 89, No.1, 2008, pp.21-29.
- 86) **Simonnot M. O., Croze V.** 2008, Procédés de traitements physiques et chimiques des sols pollués. *Techniques de l'ingénieur*, vol. JB5, n°J3981, [Note(s) : J3981.1-J3981.21]. Paris
- 87) **Sing K. B. and Reddy M. V.,** (1991), Advances in Disease-Resistance Breeding in Chickpea. *Advances in agronomy*, Vol. 45, pp : 191-222.
- 88) **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 de l'Université Paris 6. Spécialité Chimie Analytique, 242p
- 89) **Speight J. G.** The Chemistry and Technology of Petroleum. Fifth Edition. CRC Press, Etats-Unis, 2014, 984p
- 90) **Sterckeman T., Ouvrard S., Leglize P.,** (2011), Phytoremédiation des sols. *Techniques de l'Ingénieur*, BIO 5 300, 2011.

- 91) **Tanee F. B. G., Kinako P. D. S., 2008** : Comparative Studies of Biostimulation and Phytoremediation in the Mitigation of Crude Oil Toxicity in Tropical Soil J. Appl. Sci. Environ. Manage. Vol. 12. N°2. pp : 143-147.
- 92) **Touvron V.** Etude de l'impact paysager des projets de phytoremédiation concernant les friches industrielles. Master d'Architecte Paysagiste. Université de Liège (Belgique), 2018, 69p
- 93) **Udo E. J. and Fayemi A. A. A., (1975)**, The effect of oil pollution on germination growth and nutrient uptake of corn, J. Environ. Qual. 4, pp. 537-540.
- 94) **Van Nevel L., Mertens J., Oorts K., Verheyen K., (2007)**, Phytoextraction of metals from soils : How far from practice?, Environmental Pollution 150 pp. 34-40.
- 95) **Vanobberghen F.** La phytoremédiation en Wallonie : Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds. Sciences et Gestion de l'Environnement. Université Libre de Bruxelles, 2010, 81p
- 96) **Wade L. G.** Organic Chemistry. 2^e édition Pentice Hall, 1991, 1233p
- 97) **Walton B. T. and Anderson T. A., (1992)**, Plant-Microbe Treatment Systems for Toxic Waste, Current Opinion in Biotechnology 3, pp. 267-270.
- 98) **Zayed A. M. and Terry N. (1994)**, Selenim Volatilization in Roots and Shoots : Effects of Shoot Removal and Sulfate Level, J. Plant Physiol. Vol. 143. pp. 8-14
- 99) **Zebiche B. et Semaani L. 2015.** Effet de la contamination du pétrole sur la croissance du pois (*Pisumsativum*) et de la luzerne (*Medicagosativa* L.) Essai de phytoremédiation. Mémoire de Master, UMMTO, 35p.
- 100) **Zeghouane O. (2018)**, Etat des lieux et devenir des légumineuses alimentaires en Algérie : importance économique et sociale, développement et amélioration de la production et de la productivité. Congrès national sur les ressources phytogénétiques en Algérie. INRAA-Alger, pp : 55-77.
- 101) <https://www.degazagecuves.com/travaux-petroliers/depollution-station-service.html>

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Introduction

Conclusion et perspectives

Chapitre II : Matériels et Méthodes

Chapitre III : Résultats et discussions

Tables des Matières

