

République Algérienne Démocratique et Populaire.
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
Faculté Des Sciences Biologiques et Des Sciences Agronomiques.
Département Des Sciences Biologiques.



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master en biologie
Spécialité : Protection de l'environnement

Thème

**Etude de l'efficacité d'une plante
ornementale (*Chlorophytum comosum*)
dans la décontamination d'un sol
pollué aux hydrocarbures**

Réalisé par :

M^{elle} BELHOCINE Hassiba

Devant le jury :

Président : M^{me} LANDRI G.

M.A.A à l'U.M.M.T.O

Promotrice : M^{elle} ALI AHMED S.

M.A.A à l'U.M.M.T.O

Examinatrices : M^{elle} BOUTEBTOUB O.

M.C.A à l'U.M.M.T.O

M^{elle} OMOURI O.

M.C.A à l'U.M.M.T.O

Année Universitaire 2015-2016

Remerciements

En premier, nous remercions le bon dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et patience pour être ce que nous sommes aujourd'hui et pour mener à terme ce modeste travail ;

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice M^{lle} ALI AHMED maitre assistante au département de biologie à l'UMMTO pour ses précieuses orientation, son aide et ses orientations, ses conseils et son souci de réaliser ce travail de recherche ;

Nous remercions aussi très sincèrement les membres de jury la présidente M^{me} LANDRI M.A.A à l'UMMTO et les examinatrices M^{lle} OMOURI et M^{lle} BOUTEBTOUB d'avoir bien voulu accepté d'évaluer notre travail ;

Nous voudrions aussi témoigner notre reconnaissance et exprimer toute notre gratitude à nos enseignants qui ont participé pour une grande part dans notre formation ;

Nous tenons à remercier nos amis pour nous donner le courage, le soutien moral pour mener ce modeste travail ;

Enfin, nous adressons un grand merci à nos familles et à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail et à tous ceux qui nous ont apporté leur aide.



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leur soutien moral et matériel que
dieu tout puissant me les garde*

A mes frères Madjid et Lounis

A ma très chère sœur Fatma et son mari Aziz, et ces enfants Faiz et Yani

A tous mes amis

A toute la promotion de protection d'environnement sans exception

A tous ceux et celles qui m'aime.....

HASSIBA



Liste des tableaux

Tableau 1 : Différentes techniques de bioremédiation
Tableau 2 : les principaux essais de phytoremédiation réalisée à l'UMMTO
Tableau 3 : Caractéristiques du sol provenant de la station-service
Tableau 4 : test de Student pour la biomasse végétal.....
Tableau 5: test de Student pour la respirométrie
Tableau 6: test de Student pour la biomasse microbienne.....
Tableau 7 : test de Student pour le pH du sol
Tableau 8: le test de Student de la conductivité électrique
Tableau 9 : test de Student pour l'Humidité du sol
Tableau 10 : test de Student pour le taux de germination.....
Tableau 11 : test de Student pour l'élongation racinaire

Liste des figures

Figure 1 :	Composition de l'essence et de gasoil
Figure 2 :	Schéma synthétisant les différentes formes de phytoremédiation au sein de plante ..
Figure 3 :	Schéma du dispositif expérimental
Figure 4 :	La biomasse aérienne et racinaire de chlorophytum et la fève
Figure 5 :	Production cumulée de CO ₂ après 7 jours d'incubation
Figure 6 :	Biomasse microbienne dans les sols non rhizosphérique et rhizosphérique cultivés en chlorophytum et en fève
Figure 7 :	pH du sol rhizosphérique et non rhizosphérique de la fève et chlorophytum
Figure 8 :	Conductivité électrique de sol non rhizosphérique et rhizosphérique cultivé par la chlorophytum et la fève
Figure 9 :	L'humidité des sols non rhizosphériques et rhizosphériques cultivé par la chlorophytum et la fève
Figure 10 :	Taux de la germination de maïs dans les sols non rhizosphérique et rhizosphérique cultivé par les deux espèces
Figure 11 :	Elongation racinaire de maïs dans le sol non rhizosphérique et rhizosphérique après la culture de chlorophytum et la fève

Liste des abréviations

BTEX : Benzène, Toluène, Ethylène et Xylène

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique

HAM : Hydrocarbure aromatique monocyclique

UMMTO : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

INRF : Institut national des recherches forestières

ITMA: Institue Technologique Moyen d'Agronomie

pH : Potentiel Hydrique

H : L'humidité

nbr : Nombre

CE : Conductivité électrique

INA: Institut National d'Agronomie

Chlor : Chlorophytum

BA : Biomasse aérienne

BR : Biomasse racinaire

NR : Non rhizosphérique

R : Rhizosphérique

Introduction générale.....	
----------------------------	--

Chapitre I : Partie bibliographique

Introduction	1
I. Généralité sur les hydrocarbures.....	3
I.1. Classification des hydrocarbures	3
I.2. Sources des hydrocarbures.....	4
I.3. Devenir des hydrocarbures dans le sol.....	5
I.4. Les effets des hydrocarbures.....	6
II. Les procède de décontamination du sol.....	7
II.1. Les procède thermiques	7
II.2. Les procède physiques.....	8
II.3. Les procède chimiques	8
II.4. Les procède biologiques	8
II.4.1. La bioremédiation.....	8
II.4.2. La phytoremédiation.....	9
II.4.2.1. Mécanismes de phytoremédiation	9
II.4.2.2. Caractéristiques des espèces choisies en phytoremédiation	10
II.4.2.3. Les travaux de recherche sur la phytoremédiation en Algérie	10

Chapitre II : Matériel et Méthodes

I. Matériel.....	13
I.1. Matériel végéta.....	13
I.2. Sol14	
II. Méthodes	14
II.1. Dispositif expérimentale.....	15
II.2. Effets des hydrocarbures sur la biomasse végétale.....	16
II.3. Propriétés du sol rhizosphérique et non rhizosphérique après phytoremédiation	16
II.3.1. Propriétés biologiques	16
II.3.1.1. Activité biologique globale	16
II.3.1.2. Biomasse microbienne.....	16
II.3.2. Propriétés physiques et chimiques du sol	17
II.3.2.1. pH	17

II.3.2.2. Conductivité électrique.....	17
II.3.2.3. Humidité hygroscopique.....	17
II.3.3. Réalisation des bio-essai.....	18
II.3.3.1. Test de germination	18
II.3.3.2. Elongation racinaire.....	18
II.4. Méthodes d'analyses statistiques.....	18

Chapitre III : Résultats et Discussion

I. Résultats	19
I.1. Biomasse végétale.....	19
I.2. Les propriétés biologiques du sol	20
I.2.1. Activité biologique globale.....	20
I.2.2. Biomasse microbienne	21
I.3. Les propriétés physiques et chimiques du sol.....	22
I.3.1. pH.....	22
I.3.2. Conductivité électrique (CE.....	23
I.3.3. Humidité hygroscopique	24
I.4. Réalisations des bio-essais	25
I.4.1. Taux de germination	25
I.4.2. Elongation racinaire	26
II. Discussion.....	27
Conclusion générale	29

Introduction générale

Le progrès scientifique et technologique vise à faciliter la vie des peuples, mais aussi à couvrir leurs besoins en matière d'alimentation, d'habitat et d'énergie. Toutefois ses conséquences sur l'environnement sont inéluctables et néfastes.

La production des hydrocarbures est le cas le plus illustratif de l'intérêt porté à l'exploitation de la matière première, car chaque année plusieurs milliards de tonnes de combustibles fossiles sont extraits (INERIS, 2012).

Le secteur des hydrocarbures en Algérie constitue le pivot essentiel de l'économie nationale. L'utilisation de cette source d'énergie entraîne des risques de pollution des sites et des sols (puits, raffineries, stations-services, transports, etc.) (SONATRACH, 2010). Cette pollution est susceptible d'une bioaccumulation dans les chaînes alimentaires, en présentant des toxicités pour le végétal, l'animal et des risques pour la santé humaine. Lorsque le risque pour les écosystèmes et l'Homme est très élevé, la dépollution s'impose. Il existe certes des méthodes thermiques, physiques, chimiques et biologiques, dont fait partie la phytoremédiation, permettant la décomposition des polluants, mais la phytoremédiation semble être une technique particulièrement adaptée aux pays en voie de développement puisqu'elle est économique et facile à mettre en œuvre (Koller, 2004).

La phytoremédiation des contaminants présents dans les sols est une technologie émergente mettant en jeu les différentes interactions entre la matrice contaminée et l'organisme végétal. Pour les contaminants organiques tels que les hydrocarbures, la phytodégradation semble être l'approche la plus prometteuse. Elle a l'avantage de ne pas affecter la qualité intrinsèque des sols (notamment la qualité agronomique) et son application représente un faible coût. La phytoremédiation est, depuis 40 ans, un moyen de décontamination des sites contaminés avec du pétrole (Cadiere, 2006).

Cette technique de décontamination est basée sur l'emploi de certaines plantes qui, généralement en association avec les micro-organismes de la rhizosphère, éliminent, dégradent ou fixent les contaminants du sol. La phytoremédiation est un processus indirect ; une interaction s'effectue entre les racines des plantes et les micro-organismes. En général, plus les racines sont abondantes, la partie racinaire des plantes étant beaucoup plus riche en micro-organismes que les sols, plus la bioremédiation alors améliorée (Chaineau et al., 2000).

Selon Vanobberghen (2010), la phytoremediation est une méthode naturelle, absorbant les gaz à effet de serre par photosynthèse, et qui entraîne peu de désagréments visuels ou sonores, garantit un couvert végétal qui participe à la beauté du paysage et qui freine l'érosion du sol et le lessivage des particules du sol tout en assurant une augmentation des infiltrations

Introduction générale

Plusieurs travaux ont montré la tolérance de la fève à la pollution (Belcacem et Rouas, 2012 ; Zerrouki et Ouhabda, 2013 ; Bourkache et Boussenou, 2015 ; Slimani, 2015), cependant cette dernière est consommée par l'Homme. Nous allons donc chercher à remplacer cette plante légumineuse par des plantes ornementales qui peuvent être une solution, car elles ne sont pas consommées par l'Homme, ni par les animaux d'élevage. L'objectif de notre travail est de tester l'efficacité des plantes ornementales dans la dépollution d'un sol pollué aux hydrocarbures en les comparant à une espèce dont l'efficacité a été démontrée, à savoir la fève et ce en étudiant les effets de la cultures de ces deux espèces sur un sol contaminé.

Le présent travail se subdivise en trois chapitres. Le premier consiste en un rappel bibliographique sur les généralités sur les hydrocarbures (classification et les effets toxiques sur l'environnement), et les différents procédés de dépollution des sols. Le second chapitre consiste en la présentation du matériel utilisé et des méthodes adoptées pour mesurer la biomasse végétale, l'activité biologique globale, la biomasse microbienne, le pH, la conductivité électrique et l'humidité de différents sols, et évaluer l'efficacité de la phytoremédiation par le biais de bio-essais (test de germination des graines et élongation racinaires). Dans le troisième chapitre sont présentés les résultats obtenus et leur discussion.

Une conclusion générale synthétise l'ensemble des résultats obtenus dans notre étude et quelques perspectives.

ouadasadi@gmail.com ouadasadi@gmail.com De nos jours, le secteur des hydrocarbures constitue un volet important dans l'économie moderne car il représente la source la plus importante d'énergie de notre temps. La multiplication de la production des hydrocarbures dans le monde a fait que le risque de pollution devient de plus en plus grand. C'est dans cette optique que la connaissance des hydrocarbures, leurs origines ainsi que leurs effets sur les composantes de l'écosystème s'avère être d'une grande nécessité.

I. Généralités sur les Hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques, aux origines multiples qui ont un caractère ubiquiste dans l'environnement. Ces composés sont issus notamment des activités humaines et, en particulier, des processus industriels de pyrolyse et de combustion. Ils présentent une faible solubilité et tendent, en conséquence, à s'accumuler dans les sols. Ils interviennent dans 80% des cas de pollution du sol (Denys et Rollin, 2005).

I.1. Classification

Les hydrocarbures se divisent en trois familles.

I.1.1. Les hydrocarbures aliphatiques

Ce sont des molécules linéaires ou ramifiées à longue chaîne, saturés (alcane) ou insaturés (alcène ou alcyne) et substitués ou non. Ces produits flottent souvent sur les nappes souterraines et ils sont plus ou moins volatils et toxiques. Leur biodégradation est rapide lorsque les chaînes sont droites (Arnaud, 2004).

I.1.2. Les hydrocarbures cycliques

Ce sont des composés dont la chaîne carbonée est cyclique, ce sont les cycloalcane (saturés), les cycloalcène et les cycloalcynes (insaturés). Il existe une très grande diversité de structures cycliques (Arnaud, 2004). Ils sont peu toxiques, et subsistent plus longtemps que les alcanes dans le milieu (Fattal, 2008).

I.1.3. Les hydrocarbures aromatiques

Les hydrocarbures aromatiques sont classés en deux catégories selon le nombre de cycle benzéniques associés. Ils sont très toxiques et persistants car ils sont insolubles dans l'eau (Fattal, 2008).

I.1.3.1. Les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM)

Ils sont composés uniquement de carbone et d'hydrogène et renferment un anneau de benzène. Des quantités considérables d'hydrocarbures monoaromatiques sont d'origine pétrolière ou pétrochimique (Bliefert et Perraud, 2009).

I.1.3.2. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP résultent de la combustion incomplète de la matière organique. A cause de leurs propriétés hydrophobes, ils s'accumulent dans les sols et dans les sédiments des cours d'eau ainsi que dans les plantes (Ouvrard et al., 2008).

I.2. Sources des hydrocarbures dans le sol**I.2.1. Sources naturelles**

Les feux de forêts et de prairies sont considérées comme les plus importants processus naturels qui génèrent les hydrocarbures, d'autres sources naturelles existent telles que : les éruptions volcaniques, l'érosion des roches, les fuites des réservoirs naturels, ainsi que la production des hydrocarbures par les végétaux supérieures (cires) ou par les algues (Rocher et Moilleron, 2000).

I.2.2. Sources anthropiques

Les activités anthropiques telles que l'industrie, l'utilisation du pétrole et de ces dérivés (gasoil, diesel et kérosène) ainsi que la combustion incomplètes des combustibles fossiles sont à l'origine de l'accumulation des hydrocarbures dans l'environnement (Peixoto et al., 2011).

I.2.3. La distribution des carburants dans les stations-services

Plusieurs sources de la pollution du sol sont mentionnées, mais le cas d'une station-service représente une proportion très important. Les principaux liquides qui peuvent se trouver dans une station et susceptible de provoquer une pollution du sol et/ou des eaux souterraines sont les carburants (essence et gasoil). De petites quantités de carburants peuvent entraîner des conséquences négatives pour l'homme et l'environnement (Benchabane et Bouhadda, 2010).

Les carburantes sont stockés et vendus dans les stations-service. Il s'agit de mélanges complexes d'hydrocarbures pétroliers. La composition en hydrocarbure dépend de facteurs comme l'origine du pétrole brut et les conditions de raffinage (Piedrafita et Maria, 2007).

I.2.3.1. L'essence

Elle contient généralement environ 230 hydrocarbures, ayant un nombre d'atomes de carbone entre 4 et 10, l'essence est composée de 5 classes principales d'hydrocarbures qui sont : n-alcanes ou n-paraffines, iso-alcanes ou iso-paraffines, cyclanes ou cycloparaffines et les composés aromatiques (BTEX et HAP). La composition de l'essence est présentée dans la figure 1.

I.2.3.2. Gasoil :

Il contient généralement environ 2000 à 4000 hydrocarbures, dont le nombre atomes de carbone est compris entre 11 et 25, le gasoil est composé d'iso-alcane, cyclane et les composés aromatiques. Sa composition est présentée dans la figure 1.

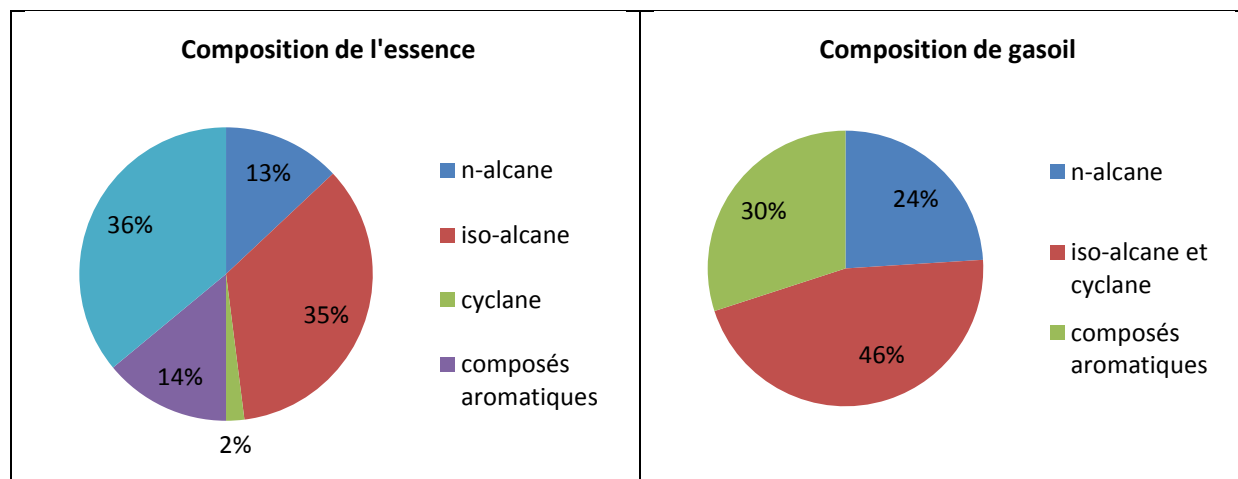


Figure 1 : Composition de l'essence et de gasoil (Saada et al., 2005).

I.3. Devenir des hydrocarbures dans le sol**I.3.1. Volatilisation**

Ce mécanisme dépend de la pression de vapeur de chaque composé, des gradients de concentration, de la densité des vapeurs de contaminant et des propriétés du sol (Saada et al., 2005).

I.3.2. Solubilisation :

Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée. Il est importants de noter que ces hydrocarbures solubles sont parmi les plus dangereux pour l'environnement, ils sont difficiles à éliminer et sont absorbés par la faune et la flore (Chocat, 2004 in Benamara et Mohammedi, 2010).

I.3.3. Dégradation abiotique**I.3.3.1. La photolyse :**

La photolyse est la décomposition chimique (oxydation) de substances sous l'action de la lumière. Elle n'a évidemment lieu qu'en surface des milieux d'exposition (sols, eaux et végétaux) (Nowak et al., 2003).

I.3.3.2. Les réactions d'oxydo-réduction

Elles sont plus souvent catalysées par des constituants inorganiques divers. Les HAP peuvent être dégradés par des réactions d'oxydoréduction, ce mécanisme est relativement important et permet une nette diminution des HAP dans le sol (Laurent et al., 2005).

I.3.3.3. Hydrolyse

L'hydrolyse a lieu dans les phases aqueuses des milieux. Il s'agit de l'action de l'eau sur un polluant, consécutive à la dissociation ionique de l'eau (Nowak et al., 2003).

I.3.4. Biodégradation

La biodégradation est le processus naturel le plus important dans la dépollution de l'environnement. Elle est la conséquence de la présence de certains microorganismes (bactéries essentiellement) dans les sols (Soltani, 2004).

I.4. Les Effets des hydrocarbures

Le type d'hydrocarbures, la durée de contact, la quantité déposée et surtout le niveau de toxicité, influent sur l'importance de l'impact. Les hydrocarbures légers sont plus toxiques que les hydrocarbures lourds, ils sont généralement plus abondants dans les hydrocarbures déversés (Fattal, 2008).

I.4.1. Effets sur le sol

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

I.4.1.1. Effet sur les propriétés physiques

Les études élaborées pour déceler l'impact des hydrocarbures sur les propriétés physiques du sol ne sont pas nombreuses. La présence des hydrocarbures dans le sol modifie légèrement sa structure. Les hydrocarbures enrobent les particules minérales et assurent leur dispersion (Rouquerol et al., 1987).

I.4.1.2. Effet sur les propriétés chimiques

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

- Une augmentation de la concentration en éléments traces tels que Mn, Zn, Fe et Pb.
- Une élévation du pH du sol et de la teneur en potassium (K) et en calcium (Ca).
- Une diminution de la teneur du sol en phosphore (P) et une augmentation en carbone organique total.

- Une augmentation de la conductivité électrique (CE) entraînant l'inhibition de croissance de certaines plantes très sensibles en présence des sels.

I.4.1.3. Effet sur les propriétés biologiques

Rouquerol et ses collaborateurs (1987) ont avancé que l'imprégnation des sols en hydrocarbures a pour effet global une multiplication intense de la microflore en particulier des bactéries, des champignons et des levures.

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

I.4.2. Effets sur les végétaux

Le sol se comporte comme un vecteur de la pollution, celle-ci pouvant atteindre la végétation de surface (Colin, 2000). D'après Chaîneau et al., (1997) un effet phytotoxique des hydrocarbures a été observé à travers la diminution du taux de germination, les retards de la croissance et la diminution du rendement.

I.4.3. Les effets sur la santé humaine

Les hydrocarbures sont susceptibles d'induire l'apparition de cancers chez les organismes qui y sont exposés par inhalation, par ingestion ou par contact. Les principaux hydrocarbures cancérigènes sont représentés par les HAP dont les plus communs sont le benzantracène, les benzopyrènes et les fluoranthènes. Bien qu'ils ne soient pas de haute toxicité, ils présentent souvent une forte, voire une très forte, cancérogénicité. La présence de substituant alkylés sur leurs molécules accroissent leur pouvoir cancérogène tandis que leur halogénéation augmente leur toxicité pour les espèces animales (Ramade, 1992).

II. Les procédés de décontamination du sol

La décontamination est un ensemble de procédés consistant 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 traitement concerne des terres excavées ou des sols et nappes phréatiques encore en place (Koller, 2004).

II.1. Les procédés thermiques

L'utilisation des hautes températures pour détruire les produits polluants, les procédés thermiques, efficaces pour une gamme très large de produits, représentent une option courante à ce jour dans les filières de la décontamination (Koller, 2004).

II.2. Les procédés physiques

Ce sont les méthodes les plus largement utilisées. Le principe consiste à utiliser des fluides, présents dans le sol ou injectés comme vecteur pour transporter la pollution vers des points de concentration et d'extraction (Colin, 2000).

II.3. Les procédés chimiques

Les procédés chimiques ont pour but de détruire les polluants ou les transformer sous une forme moins nocive pour l'environnement, en provoquant des réactions chimiques entre les polluants contenus dans le sol et un réactif ajouté. La majorité des procédés exigent que les sols soient formés de boues ou que les contaminants soient mobilisés dans le milieu (Colin, 2000).

II.4. Les procédés biologiques

L'utilisation des méthodes biologiques permet entre autres de favoriser la dégradation totale ou partielle des polluants. Ces techniques peuvent utiliser les bactéries, les champignons et les végétaux afin de décontaminer un site pollué (Koller, 2004).

Il existe deux catégories principales : les techniques de bioremédiation qui utilisent les microorganismes, essentiellement des bactéries, et les techniques de phytoremédiation qui exploitent les propriétés des végétaux (Chevrier, 2013).

II.4.1. La bioremédiation

La bioremédiation est basée sur l'utilisation de souches microbiennes (bactéries et/ ou champignons). Elle consiste à utiliser ces organismes pour transformer des substances chimiques toxiques en substances non toxiques (Chevrier, 2013), dont les techniques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Différentes techniques de bioremédiation (VIDALI, 2001).

Techniques	Principe
Bioaugmentation	Addition d'une culture des bactéries dans le milieu contaminé. Utilisée couramment dans les bioréacteurs et le système <i>ex-situ</i> .
Biofiltration	Utilisation d'un biofiltre pour traiter les émissions gazeuse.
Biostimulation	Stimulation des populations de microorganismes indigènes, présentes dans le sol ou les eaux souterraines. Elle peut être utilisée <i>in-situ</i> ou <i>ex-situ</i> .
Bioréacteur	Déroulement de la biodégradation dans des réacteurs ou bassins.
Compostage	La présence des matières organiques non toxiques (déchets ménagers au agricoles) permet le développement des microorganismes et élévation de la température.
Biolixiviation	Excavation de la couche à dépolluer, son emballage dans une membrane étanche, l'apport des nutriments indispensables aux microorganismes et la remise en place du sol ainsi traité. Utilisée pour la dépollution des métaux non dégradables.

II.4.2. Phytoremédiation

La phytoremédiation est un ensemble de technologies utilisant les plantes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques polluants (naturels ou de synthèse) du sol, de l'eau ou de l'air, provenant d'activités humaines. Cette technique permet également de traiter des pollutions inorganiques (éléments traces métalliques, radionucléides) (Schnoor, 2003).

II.4.2.1. Mécanisme de la phytoremédiation

Plusieurs mécanismes permettent aux plantes l'élimination des polluants par phytoremédiation (figure 2).

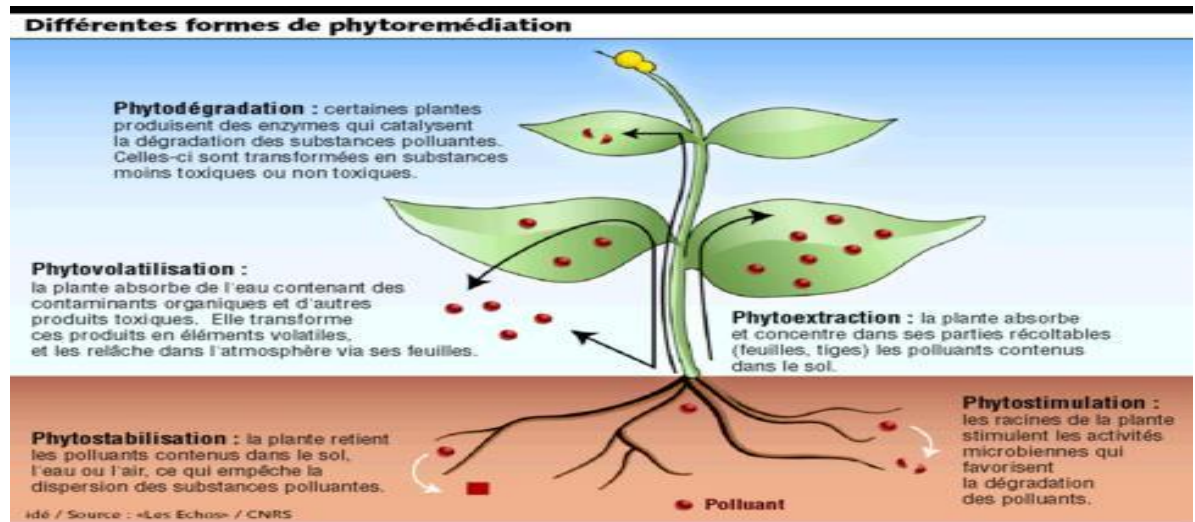


Figure 2 : Schéma synthétisant les différentes formes de phytoremédiation au sein de plante (Chevrier, 2013).

II.4.2.1.1. Phytoextraction

Elle consiste à utiliser, sur les sols contaminés, des plantes accumulatrices pour extraire, transporter et concentrer les polluants de l'eau ou de 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, 2004).

II.4.2.1.2. Rhizofiltration

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

II.4.2.1.3. Phytostabilisation

Il s'agit de l'utilisation des plantes pour réduire la biodisponibilité, la mobilisation ou le lessivage des polluants, par conséquent, leur entrée dans la chaîne alimentaire ou les nappes phréatiques (Koller, 2004).

II.4.2.1.4. Phytovolatilisation

Cette technique utilise les plantes pour extraire les polluants puis les éliminer par évapotranspiration via les stomates des feuilles ou les tiges. Une fois volatilisés, les polluants se dispersent dans l'atmosphère à des concentrations qui, normalement, ne représentent plus un danger pour l'homme (Vanobberghen, 2010).

II.4.2.1.5. Phytostimulation

La phytostimulation, aussi nommée rhizodégradation, consiste en la dégradation des contaminants présents dans la rhizosphère par l'activité microbienne qui est favorisée par la

présence des plantes. Les plantes peuvent modifier les propriétés physico-chimiques et biologiques de la rhizosphère par la sécrétion d'exsudats racinaires (Chevrier, 2013).

II.4.2.2. Caractéristiques des espèces végétales choisies en phytoremédiation :

L'utilisation d'une ou plusieurs espèces végétales est nécessaire, et leur choix doit être judicieux. Il faudra privilégier des espèces indigènes du site à remédier plutôt que des plantes hors de leur aire d'origine qui pourraient devenir des espèces invasives.

Les espèces choisies devraient être capable de supporter la contamination mais aussi les autres stress souvent présents comme la sécheresse ou le manque de nutriments. Elles doivent aussi avoir une croissance rapide, comme la luzerne, le pois, l'orge et le blé.

III. Les travaux de recherche sur la phytoremédiation en Algérie

Les travaux de recherche en Algérie sont encore au stade expérimental. Au niveau de notre faculté quelques travaux ont été réalisés ces dernières années, sur le sol contaminé par les hydrocarbures, dont la synthèse est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2 : les principaux essais de phytoremédiation réalisés à l'UMMTO

Espèces utilisées	Sols contaminés	Résultats	Auteurs
Orge (<i>Hordeum vulgare</i>) Luzerne (<i>Medicago sativa</i>).	Sol de la ferme de l'INA, pollué au pétrole brut de Hassi Messaoud.	-Effet négatif du pétrole sur la croissance des espèces -Effet positif de la luzerne sur l'activité biologique du sol.	Ali Ahmed et Belkaid (2006)
Orge (<i>Hordeum vulgare</i>) Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Sol de l'ITMA, pollué au pétrole brut de Hassi Messaoud et à l'essence.	-L'essence est moins phytotoxique que le pétrole brut. -Efficacité de la phytoremédiation par ces espèces.	Fezani et Khider (2007)
Pois (<i>Pisum sativum</i>) Pois chiche (<i>Cicer arietinum</i>)	Sol de l'ITMA pollué au pétrole brut de Hassi Messaoud.	-Efficacité de la phytoremédiation (diminution de la quantité d'hydrocarbures dans le sol)	Benamara et Mohammedi (2010)
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>) Pois chiche (<i>Cicer arietinum</i>)	Sol de l'ITMA, contaminés par le pétrole et par l'essence	-Pas de phytotoxicité par les deux polluants -L'essai de phytoremédiation est satisfaisant pour les deux espèces.	Ait Tayeb et Titouche (2011)
Fève (<i>Vicia faba</i>) Trèfle (<i>Trifolium alexandrium</i>)	Sol de l'ITMA, contaminé par le pétrole	-La phytoremédiation est efficace par la fève -Fève plus résistante que le trèfle envers le pétrole et l'essence.	Belkacem et Rouas (2012)
Fève (<i>Vicia faba</i>)	Sol de l'ITMA contaminé par l'essence super et gasoil	-Effet négatifs des carburants sur le rendement de la partie racinaire de la plante. -La réduction de la quantité des hydrocarbures n'est pas importante.	Alilouche et Toudouft (2014)
Fève (<i>Vicia faba</i>)	Sol de l'ITMA contaminé par l'essence	-L'essence a un effet toxique sur la fève au-delà de la concentration de 3%	Kettane (2015)

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur la phytoremédiation en utilisant des légumineuses ou des graminées pouvant être consommées par l'Homme et les animaux d'élevage, ce qui présente un risque pour l'Homme, soit directement ou par passage dans la chaîne trophique. L'utilisation de plantes ornementales qui ne sont consommées ni par l'Homme ni par les animaux d'élevage, pourrait donc être envisagée.

Notre travail a été réalisé au laboratoire de pathologie des écosystèmes de la faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Il s'agit d'une culture en pots de plantes ornementales à des fins de remédiation d'un sol pollué aux carburants.

I. Matériels

I.1. Matériel végétal

Pour répondre aux objectifs de notre travail, nous avons utilisé trois espèces végétales, à savoir *Chlorophytum* et la fève et le maïs.

I.1.1. Fève

La fève (*Vicia faba*) est une légumineuse qui fait partie de nos systèmes agraires depuis fort longtemps, les graines produites sont utilisées pour l'alimentation humaine et animale.

La fève possède un système racinaire pivotant et est caractérisée par la présence sur ses racines de bactéries de type symbiotique dans les nodosités.

D'après les résultats de Belkacem et Rouas (2012), Zerrouki et Ouhadda (2013) et Chibane (2013), la fève figure parmi les plantes qui tolèrent des teneurs importantes en hydrocarbures et a été efficace dans la décontamination des sols pollués aux hydrocarbures. Elle est, de ce fait, utilisée dans ce travail comme référence de l'efficacité de la phytoremédiation.

I.1.2. *Chlorophytum*

Chlorophytum comosum est une espèce de la famille des Iridacées. C'est une plante ornementale d'appartement et elle est largement répandue dans le monde. Elle est sans doute la plus connue du genre *Chlorophytum*. Elle est facile à cultiver et s'adapte facilement à tous les types de sol. Elle est caractérisée par des racines fasciculées, nombreuses et grosses.

Cette plante a déjà montré son efficacité dans la dépollution de l'air intérieur grâce à ses feuilles. Elle est notamment efficace dans le cas d'une pollution par le monoxyde de carbone et le dioxyde d'azote ainsi que certains composés organiques volatils (COV), comme le méthanal ou le xylène (Mangin, 1990).

C'est cette espèce qui est testée dans le présent travail quant à son aptitude à décontaminer un sol pollué aux hydrocarbures par comparaison avec la fève.

I.1.3. Maïs :

Le maïs (*Zea mays*) est une plante tropicale herbacée annuelle de la famille des Poacées, cultivée comme céréale dans diverses zones agro-écologiques. Le maïs constitue l'aliment de base de nombreuses populations (humaine et animale), il sert aussi de matière première dans certaines industries (agroalimentaire, textile, pharmaceutique, etc.), pour la création de plastiques biodégradables, de biocarburants et même de l'alcool.

Le maïs possède un système racinaire du type fasciculé. Les racines qui sont adventives aériennes se forment à la base des tiges (Cuny et al., 1989).

Le maïs est utilisé dans les essais biologiques pour estimer l'efficacité des traitements appliqués à la fin de l'essai de phytoremédiation car il fait partie des plantes les plus sensibles à la présence des hydrocarbures dans le sol (Chaineau et al., 1996).

I.2. Sol

L'étude expérimentale a été réalisée sur un sol provenant d'une station-service sise à Boukhalfa. C'est un sol contaminé par l'essence super et le gasoil.

D'après les analyses effectuées au laboratoire de pédologie de l'INRF de Bainem, ce sol présente les caractéristiques consignées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques du sol provenant de la station-service.

Caractéristiques	Résultats
pH	7,2
CE	0,74 mmhos/cm
C _{Org}	8,84 %
N _{tot}	0,3%
P(P ₂ O ₅)	5,45 mg P ₂ O ₅ /Kg du sol
Texture	Limono-argileuse

Le sol utilisé dans notre essai est de pH neutre, d'une texture limono-argileuse ce qui signifie que c'est un sol lourd muni d'une capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs. C'est un sol non salé, riche en carbone organique et faiblement pourvu en azote et en phosphore (Baize, 2000).

II. Méthodes :

L'étude consiste en une comparaison entre deux espèces, la fève qui a montré une grande efficacité de décontamination, et une plante ornementale (chlorophytum) dans la dépollution d'un sol pollué aux carburants, et l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol. Cette étude est mise en œuvre en mesurant les biomasses aériennes et racinaires de chlorophytum et de la fève, le pH, la conductivité électrique, l'humidité hygroscopique, la biomasse microbienne et l'activité biologique globale du sol.

II.1. Dispositif expérimental

Le sol utilisé a été tamisé à l'état frais à l'aide d'un tamis à mailles de 4 mm de diamètre, puis réparti sur 8 pots de 10 cm de diamètre et d'une profondeur de 12 cm. Nous avons mis dans chacun 1 Kg de sol.

Le semis de la fève, à raison de 4 graines par pot, et la culture de chlorophytum, avec un plant par pot, ont été réalisés le 08/02/2016, avec 4 répétitions pour chaque lot.

L'observation et le suivi de l'état des cultures sont quotidiens avec un arrosage régulier pendant une durée de 8 semaines. La figure suivante montre la répartition du sol de deux espèces dans les pots.

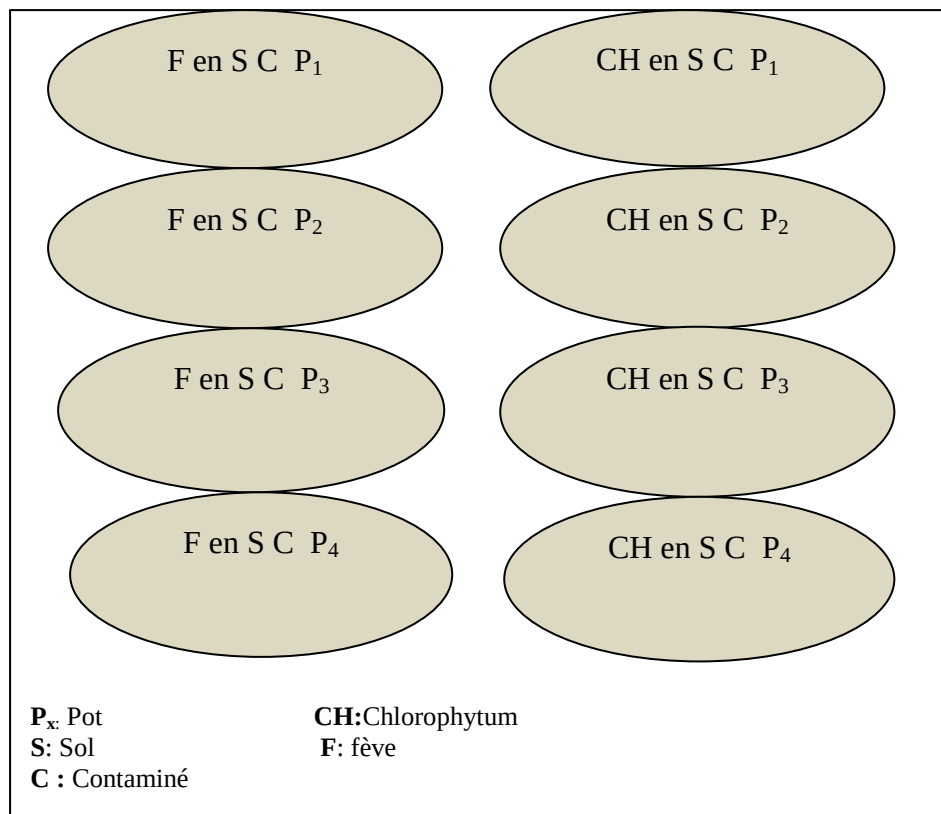


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental.

II.2. Effets des hydrocarbures sur la biomasse végétale

Pour évaluer la croissance de la fève et de chlorophytum, la biomasse végétale a été mesurée.

II.2.1. Biomasse aérienne

A la fin de la culture, le poids de la partie aérienne des plantes, des différents lots de chaque sol, a été pesé après séchage à l'air libre jusqu'à poids constant.

II.2.2. Biomasse racinaire

Elle consiste à peser le poids des racines après nettoyage à l'eau, et en suivant les mêmes étapes que pour la biomasse aérienne.

II.3. Propriétés du sol rhizosphérique et du sol non rhizosphérique après phytoremédiation**II.3.1. Propriétés biologiques****II.3.1.1. Activité biologique globale**

Elle consiste à enregistrer les quantités de CO₂ dégagé lors d'une incubation pendant une semaine à 28°C. Le CO₂ dégagé est capté par une solution de NaOH à 0.5N contenue dans des tubes à hémolyse, les tubes remplis de soude étant placés dans les flacons bien fermés et contenant 20g de sol chacun et des tubes contenant de l'eau pour éviter le dessèchement du sol. Après incubation, la soude contenue dans les tubes est titrée par l'acide sulfurique (H₂SO₄) à 0.25N en ajoutant 2 à 3 gouttes de phénophtaléine.

Le virement de couleur du rose violet au transparent incolore marque la fin de la titration.

II.3.1.2. Biomasse microbienne

La biomasse microbienne est déterminée par fumigation-extraction.

Nous avons pesé 4g de sol pour chaque échantillon que nous avons mis dans 16 coupelles qui sont fumigées par les vapeurs de chloroforme pendant 18 heures à 20°C. 16 autres coupelles contenant chacune 4g du sol de chaque pot n'ont pas été exposées aux vapeurs de chloroforme ; il s'agit du sol non fumigé. A la fin de la fumigation, le sol de chacune des 32 coupelles est mélangé dans un Erlenmeyer avec 20 ml de sulfate de potassium à 0.05N (rapport sol/solution de 1/5). Le mélange est agité pendant 40 mn à l'aide d'un agitateur magnétique puis filtré dans des béchers pour récupérer l'extrait contenant le carbone extractible qui est séché à 105°C dans une étuve pendant 24 heures. Le carbone est ensuite dosé par la méthode Anne (1945).

Le principe de cette méthode repose sur l'oxydation du carbone organique en CO₂ par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique à chaud. L'excès de bichromate de potassium est titré à froid par une solution de sel de Mohr, faire une attaque chimique par un volume de 15 ml d'acide sulfurique et de 10 ml de bichromate de potassium à 8 % (pour chaque bécher), porter les bécher sur bain de sable pendant 5 mn à partir de la première goutte condensée, retirer les bécher et laisser refroidir, transvaser dans une fiole de 200 ml et ajuster avec de l'eau distillée au trait de jauge, prélever une aliquote de 20 ml et ajouter 200 ml d'eau distillée, ajouter 5 ml de fluorure de sodium à 3% et 4 à 5 gouttes de diphénylamine, titrer à froid le bichromate en excès avec une solution de sel de Mohr à 0.02N, la solution à doser passera par les couleurs : brune, noirâtre, violette et verte.

Détermination du carbone de la biomasse microbienne :

La quantité de carbone soluble dans l'extrait du sol fumigé et non fumigé est utilisée selon l'équation suivante :

$$B_c = (CF - CNF) / K_{ec}$$

B_C : Carbone de la biomasse microbienne.

CF : Carbone du filtrat K₂SO₄ du sol fumigé.

CNF : Carbone dans le filtrat K₂SO₄ du sol non fumigé.

K_{ec} : Coefficient d'efficacité d'extraction du carbone de la biomasse microbienne.

II.3.2. Propriétés physiques et chimiques du sol

II.3.2.1. pH

Pour évaluer le pH, le sol de chaque pot est mélangé avec l'eau distillée au rapport de 2/5 (masse/volume), après agitation pendant 1 mn à l'aide d'un agitateur mécanique et repos 2 heures, le pH a été mesuré avec un pH-mètre HI .

II.3.2.2. Conductivité électrique

Elle traduit la concentration en électrolyte d'une solution. Le sol est mélangé avec l'eau distillée au rapport 1/5 (masse/volume) puis agité. Le mélange est laissé décanter pendant une nuit puis filtré. La CE est mesurée à l'aide d'un conductimètre LF 42.

II.3.2.3. Humidité hygroscopique

Consiste à déterminer l'humidité des sols des deux cultures. Elle est mesurée par la formule suivante :

$$H\% = (\text{Poids du sol à l'état frais} - \text{Poids du sol à l'état sec}) / \text{Poids du sol frais} \times 100$$

II.3.3. Réalisation des bio-essais

Nous avons effectué ce test dans le but d'évaluer l'efficacité de la phytoremédiation.

II.3.3.1. Test de germination

Après la récolte, nous avons procédé à un test de germination, dans les échantillons du sol utilisés dans l'expérience. Le semis est réalisé dans des boîtes de Pétri en mettant 100 graines de maïs dans le sol de chaque pot.

Les graines germées sont dénombrées et le taux de germination est calculé comme suit :

$$\text{Taux de germination (\%)} = (\text{nb de graines germées} / \text{nb total des graines}) \times 100$$

II.3.3.2. Elongation racinaire

Après le dénombrement des grains germés, nous avons pris 5 graines parmi celles ayant germé pour mesurer la longueur racinaire avant de les remettre à nouveau en boîte de Pétri pour deux autres semaines, on mesure pour la deuxième fois la longueur des racines puis on calcule l'élongation racinaire de la façon suivante :

$$\text{Longueur racinaire} = \text{Longueur de la racine après la 4}^{\text{ème}} \text{ semaine de semis} - \text{la longueur après la 2}^{\text{ème}} \text{ semaine}$$

II.4. Méthodes d'analyse statistique

Le traitement des résultats des analyses et des mesures a été réalisé avec le logiciel R 3.1.1. Les résultats ont été soumis au test de Student pour comparer les moyennes obtenues dans le sol cultivé avec la fève et celui cultivé avec chlorophytum.

Dans notre travail, nous avons comparé l'efficacité d'une plante ornementale (chlorophytum) à une plante dont l'efficacité a été démontrée (la fève).

I. Résultats

I.1. Biomasse végétale

Les résultats obtenus après la mesure de la biomasse végétale de chlorophytum et de la fève, représentée dans la figure 4.

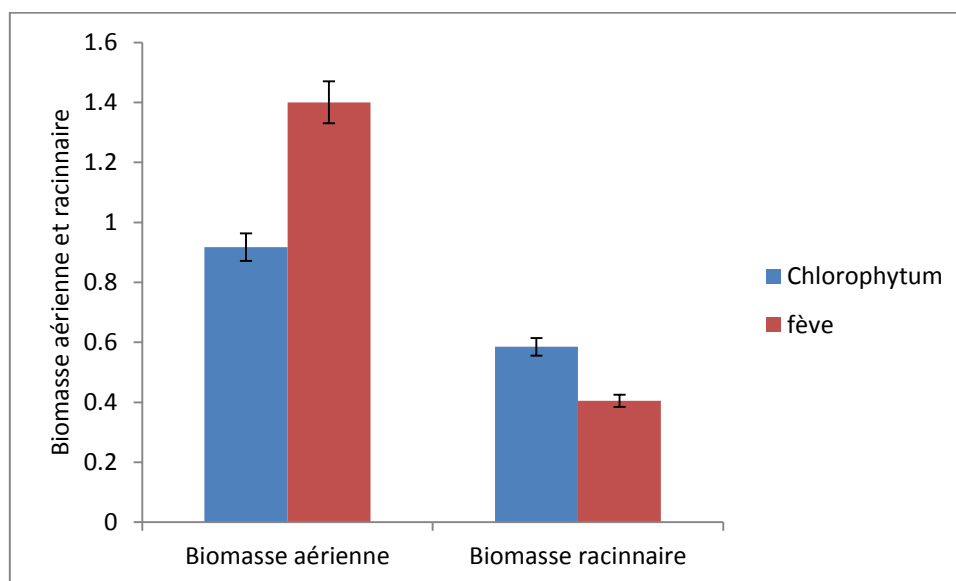


Figure 4 : la biomasse aérienne et racinaire de chlorophytum et de la fève

Le chlorophytum présente une biomasse aérienne de 0.1975 g et 0.585 g de biomasse racinaire pour la fève nous avons enregistré une biomasse aérienne de 1.4 g et une biomasse racinaire de 0.405 g. Les hydrocarbures n'ont pas le même effet sur la biomasse végétal de ces espèces.

Le test de Student pour la biomasse végétale montre qu'il n'a pas de différence significative pour les deux espèces (la chlorophytum et la fève) (tableau 4)

Tableau 4 : test de Student pour la biomasse végétal

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
BA	0.1975	1.4000	-0.9038	6	0.4009	NS
BR	0.585	0.405	0.6278	6	0.5533	NS

I.2. Les propriétés biologiques du sol

I.2.1. Activité biologique globale

Les résultats de la respirométrie sont illustrés dans la figure 5.

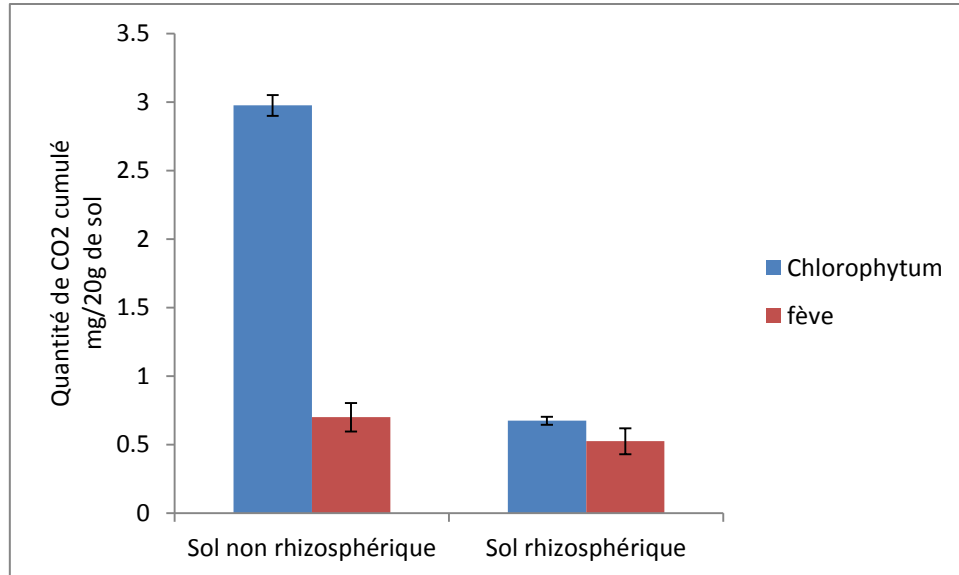


Figure5 : production cumulée de CO₂ après une semaine d'incubation.

Les résultats montrent que le dégagement de CO₂ cumulé atteint une moyenne de 2.975mg/100g de sol non rhizosphérique de chlorophytum et 0.7 mg/100g de sol non rhizosphérique de la fève.

Dans le sol rhizosphérique 0.675 mg/100g de sol de chlorophytum et 0.525 mg/100g de sol rhizosphérique de la fève.

D'après les résultats le dégagement de CO₂ cumulé est beaucoup plus élevé dans le sol non rhizosphérique cultivé avec chlorophytum par rapport aux autres sols.

Le test de Student pour la respirométrie montre qu'il n'a pas de différences significatives pour les deux sols ; rhizosphérique et non rhizosphérique cultivés avec chlorophytum et la fève (tableau 5).

Tableau5 : test de Student pour la respirométrie

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	2.975	0.700	0.9809	3.012	0.3987	NS
Sol R	0.675	0.525	1.6977	4.079	0.1634	NS

I.2.2. Biomasse microbienne

La biomasse microbienne d'un sol est fonction du carbone disponible pour satisfaire les besoins énergétiques des micro-organismes.

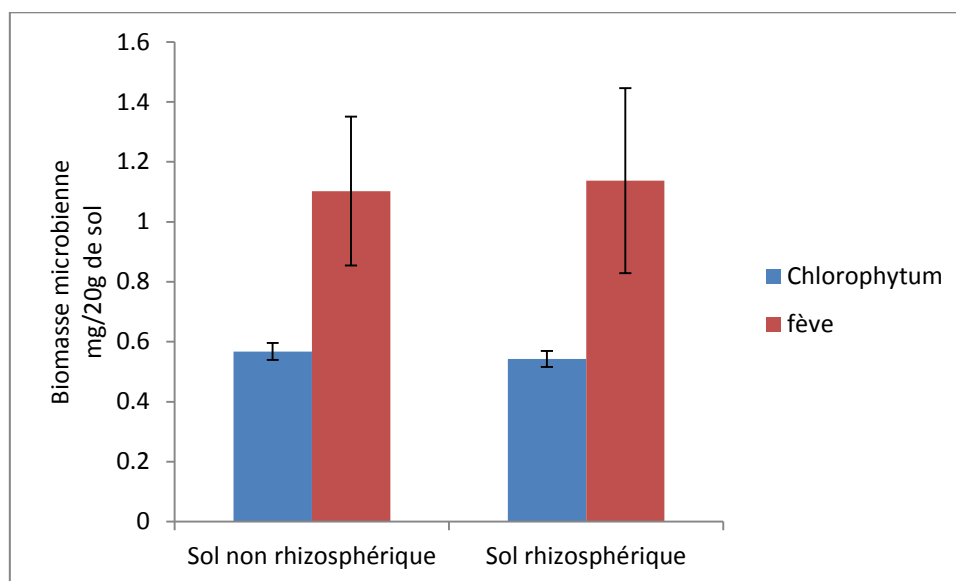


Figure 6 : Biomasse microbienne dans les sols non rhizosphérique et rhizosphérique cultivés en chlorophytum et en fève.

Les résultats de notre étude représentés dans la figure 6, montrent que cette biomasse a atteint, dans le sol non rhizosphérique, la valeur de 0.5675 mg de C/100g de sol cultivé avec chlorophytum, elle est de 1.1025 mg/100g de sol cultivé avec la fève.

Par ailleurs ces résultats, au niveau du sol rhizosphérique, sont de 0.5425 mg de C/100g de sol de chlorophytum et 1.1375 mg de C/100g de sol de la fève.

Le test de Student ne montre pas une différence significative pour les deux sols, non rhizosphérique et rhizosphérique cultivé avec le chlorophytum et la fève (tableau 6)

Tableau 6 : test de Student pour la biomasse microbienne

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	0.5675	1.1025	0.0709	6	0.9458	NS
Sol R	0.5425	1.1375	-0.0598	6	0.9543	NS

I.3. Les propriétés physiques et chimiques du sol

I.3.1.pH

La figure 7 représente les résultats du pH des sols rhizosphérique et non rhizosphérique des pots cultivés avec la fève et chlorophytum

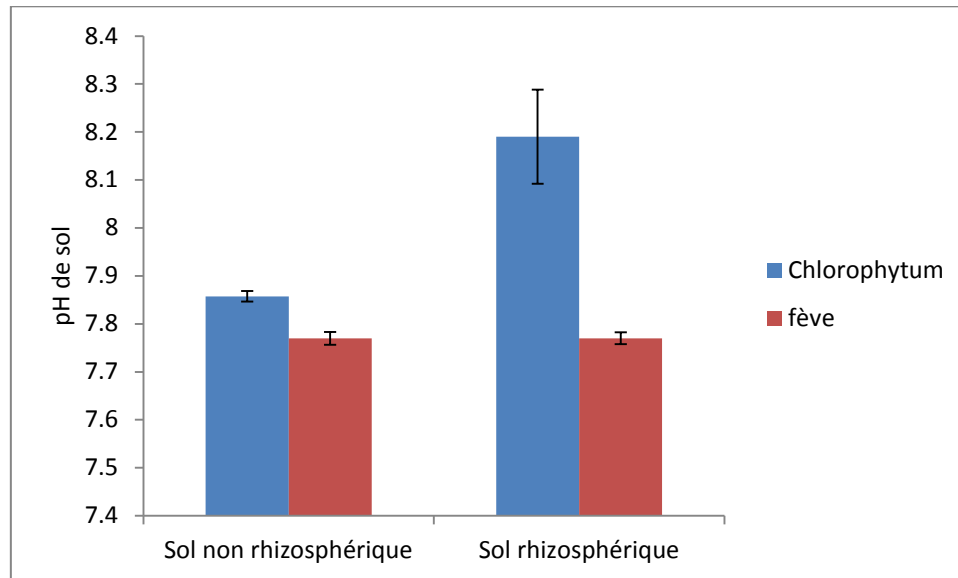


Figure 7 : pH du sol rhizosphérique et non rhizosphérique de la fève et chlorophytum

Le sol non rhizosphérique présente un pH de 7.8575 et 7.77 pour la culture de chlorophytum et la fève prospectivement, et dans le sol rhizosphérique est 8.19 dans le sol cultivé avec chlorophytum, 7.77 dans le sol rhizosphérique de la fève.

La différence du pH du sol rhizosphérique cultivé par chlorophytum et la fève est significative, contrairement au sol non rhizosphérique où la différence n'est pas significative (tableau 7).

Tableau 7 : test de Student pour le pH du sol

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	7.8575	7.77	0	6	1	NS
Sol R	8.1900	7.77	-3.366	3.094	0.04157	S

I.3.2. Conductivité électrique (CE)

Les résultats de la conductivité électrique du sol non rhizosphérique et du sol rhizosphérique cultivé avec la chlorophytum et avec la fève sont représentés dans la figure 8.

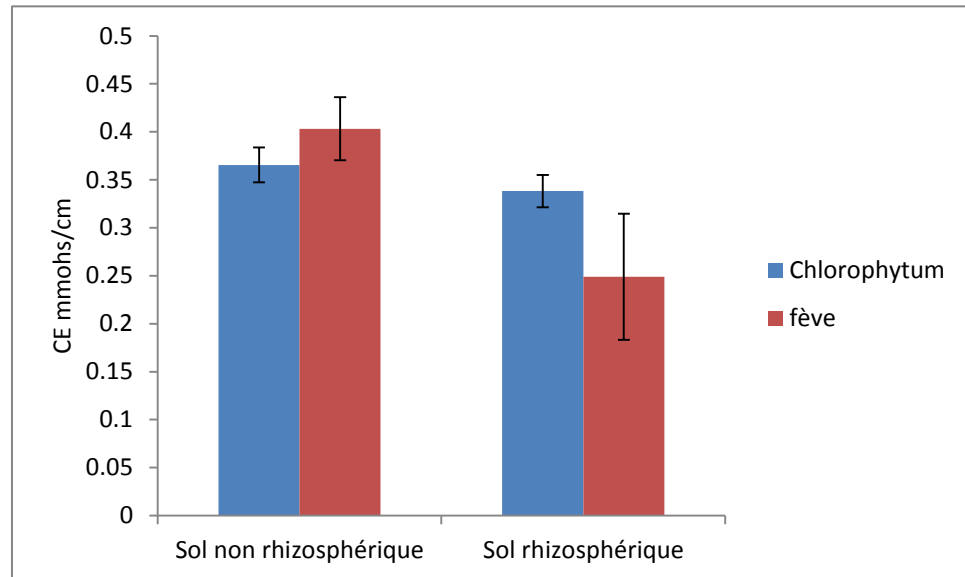


Figure8 : Conductivité électrique de sol non rhizosphérique et rhizosphérique cultivé avec la chlorophytum et la fève.

Le sol non rhizosphérique des deux cultures de chlorophytum et la fève présente une CE de 0.3655 mmhos/cm et 0.40325 mmhos/cm, la comparaison de cette valeur à celle apparaitre une diminution pour les sols des deux cultures qui sont respectivement 0.33825 mmhos/cm et 0.249 mmhos/cm.

Le test de Student ne montre pas une différence significative entre les deux espèces qui sont le chlorophytum et la fève (tableau 8).

Tableau 8 : le test de Student de la conductivité électrique

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	0.36550	0.40325	0.1312	6	0.8999	NS
Sol R	0.33825	0.24900	0.9937	4.254	0.375	NS

I.3.3. Humidité hygroscopique

Les résultats de l'humidité sont présents dans la figure 9.

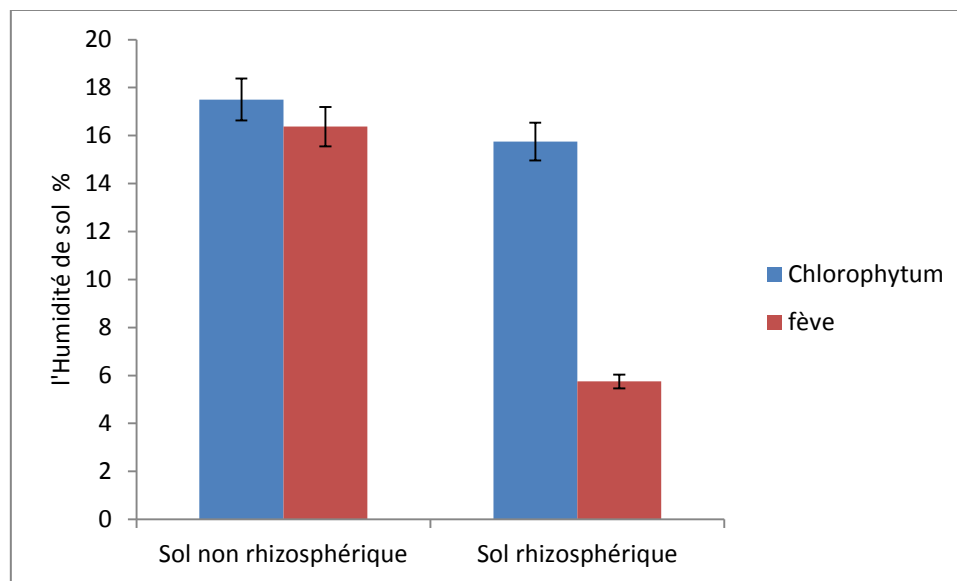


Figure 9 : L'humidité hygroscopique des sols non rhizosphériques et rhizosphériques cultivés avec le chlorophytum et la fève

L'humidité de sol non rhizosphérique est 17.5% dans le sol cultivé avec chlorophytum et de 16.375 % dans le sol cultivé avec la fève. Ces valeurs sont de 15.75% et de 5.75% dans le sol rhizosphérique cultivé avec chlorophytum et la fève.

La fève présente une diminution moins élevée de l'humidité par rapport à celui enregistré pour chlorophytum.

Le test de Student (tableau 9) ne montre pas une différence significative pour le sol non rhizosphérique, mais il présente une différence très hautement significative pour le sol rhizosphérique.

Tableau 9 : test de Student pour l'humidité hygroscopique du sol

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	17.500	16.375	0.1246	3.861	0.907	NS
Sol R	15.75	5.75	14.771	6	6.052×10^{-6}	TH S

I.4. Réalisations des bio-essais

I.4.1. Taux de germination

Le taux de germination des graines du maïs dans les sols non rhizosphérique et rhizosphérique cultivé avec les deux espèces est illustré par la figure 10.

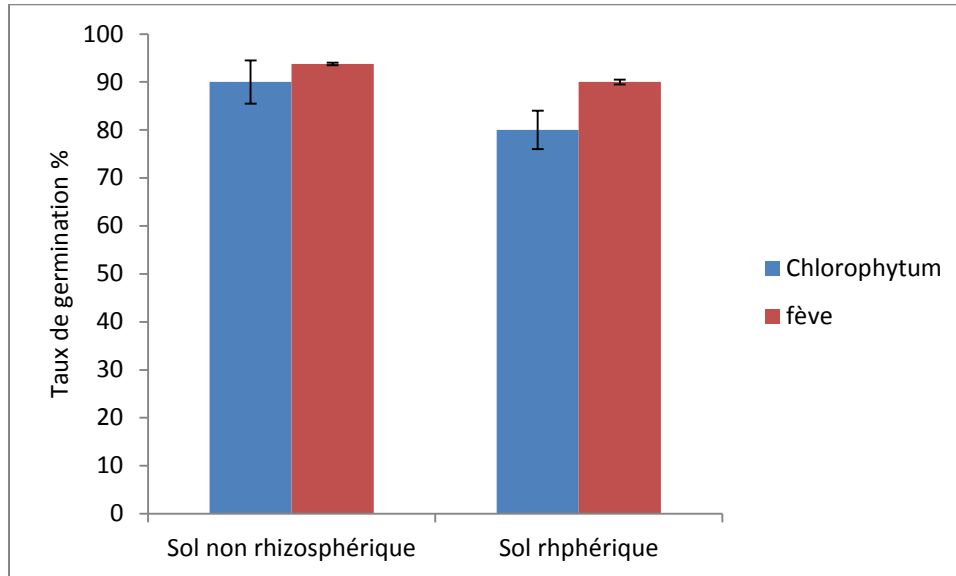


Figure10: Taux de la germination des graines du maïs dans les sols non rhizosphérique et rhizosphérique cultivé avec les deux espèces.

Dans le sol non rhizosphérique, le taux de germination est de 90 % dans le sol de chlorophytum et 93.75 % dans le sol de la fève.

Dans le sol rhizosphérique, le taux de germination est de 80% dans le sol de chlorophytum et 90 % dans le sol de la fève.

Nous constatons que le taux de germination des graines de maïs est très élevé dans les différents sols cultivés avec le chlorophytum et la fève par rapport au taux de germination qui est enregistré dans le sol contaminé qui est de 10% avant la culture du chlorophytum et de la fève.

Le test de Student ne montre pas une différence significative pour le sol non rhizosphérique cultivé avec chlorophytum et la fève, mais il présente une différence significative pour le sol rhizosphérique (tableau10).

Tableau10 : test de Student pour le taux de germination des graines du maïs

	chlor	fève	T	df	p-value	S(*)
Sol NR	90	93.75	-0.5447	5.982	0.6057	NS
Sol R	80	90	-2.8284	5.4	0.03371	S

I.4.2. Elongation racinaire

La figure 11 présente l'élongation racinaire des graines de maïs dans le sol cultivé avec chlorophytum et la fève.

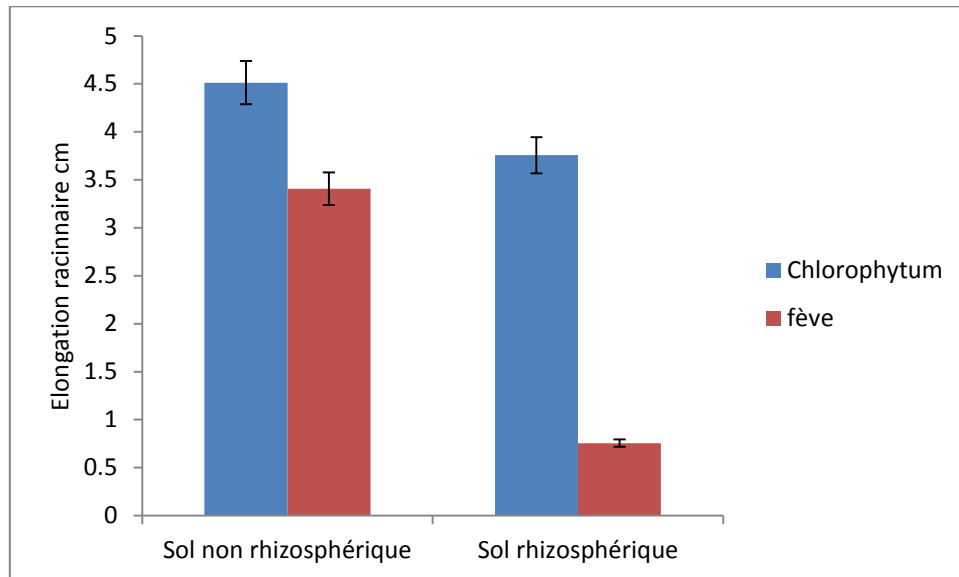


Figure 11 : Elongation racinaire de maïs dans le sol non rhizosphérique et rhizosphérique après la culture de chlorophytum et la fève.

L'élongation racinaire est de 4.5125 cm et 3.40625 cm dans le sol non rhizosphérique cultivé avec la chlorophytum et la fève respectivement, et elle est de respectivement 3.75625 cm et de 0.75625 cm dans le sol rhizosphérique cultivé avec le chlorophytum et la fève.

Nous avons constaté que l'élongation racinaire du maïs est moins élevée dans le sol cultivé avec la fève particulièrement le sol rhizosphérique comparativement à celui enregistré sur le sol cultivé par la chlorophytum.

Le test de Student ne montre pas une différence significative pour le sol non rhizosphérique cultivé avec le chlorophytum et la fève, et montre une différence significative pour le sol rhizosphérique (tableau 11).

Tableau 11 : test de Student pour l'élongation racinaire les graines du maïs

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	4.51250	3.40625	1.8113	6	0.1201	NS
Sol R	3.75625	0.75625	-4.1131	3.829	0.01606	S

I. Discussion

Dans le sol cultivé avec *chlorophytum* et celui cultivé avec la fève nous n'avons pas observé de différence significative concernant la biomasse végétale, l'activité biologique, la biomasse microbienne et la conductivité électrique du sol rhizosphérique et du sol non rhizosphérique, ce qui signifie que les deux espèces (*chlorophytum* et la fève) ont agi de la même façon sur les propriétés du sols, même si le système racinaire des deux espèces est différent. La fève possède un système racinaire pivotant et caractérisé par la présence de bactéries de type symbiotique au niveau des nodosités, par contre *chlorophytum* possède un système racinaire fasciculé qui présente des racines nombreuses et grosses (Mangin, 1990).

Nous pouvons dire que les deux espèces ont toléré la présence des hydrocarbures dans le sol. Selon Bergue (1986), les effets de ces polluants dépendent de l'espèce végétale et du stade physiologique de la végétation.

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

La différence de pH mesuré dans le sol rhizosphérique cultivé avec *chlorophytum* et la fève est significative. On peut corrélérer cette diminution à la dégradation des hydrocarbures. D'après Njuko et al. (2009), la diminution du pH est due à la dégradation des hydrocarbures, elle pourrait être due précisément à l'accumulation des acides organiques produits lors de la dégradation dans le sol.

L'humidité du sol cultivé avec la fève est moins élevée par rapport à celle enregistrée dans celui cultivé avec *chlorophytum*. Cette différence peut être due à la diminution de la quantité des hydrocarbures dans ce sol, ce qui laisse supposer qu'il y a eu dégradation de ces derniers. Selon Bergue (1986), les sols contenant une assez grande quantité d'hydrocarbures ont 2% d'humidité de plus que les sols n'en contenant pas, du fait que l'hydrocarbure est une huile visqueuse qui rend difficile l'évaporation de l'eau du sol et accroît sa rétention en eau. D'après Mangin (1990), *chlorophytum* possède des racinaires tubérisées, nombreuses, grosses et gorgées d'eau.

Les résultats obtenus pour le taux de germination des graines du maïs dans le sol ayant porté *chlorophytum* est proche de celui obtenu dans le sol cultivé avec la fève, et ils sont tous les deux beaucoup plus élevés par rapport au taux de germination observé avant la culture (10%). L'amélioration du taux de germination du maïs dans le sol traité pourrait donc être corrélée avec la dissipation importante des hydrocarbures, ceci conduit à l'amélioration de la qualité du sol. Selon Schnoor et al. (2003), plus les racines sont abondantes plus elles fournissent une surface de développement importante pour la microfaune et microflore rhizosphériques. De ce fait, les exsudats racinaires favorisent la transformation des polluants

organiques en forme moins toxique. L'exsudation racinaire est considérée comme le facteur le plus important qui conduit à des changements microbiens au sein de la rhizosphère et le facteur potentiel de renforcement de la biodégradation du pétrole. Les exsudats racinaires peuvent avoir un rôle dans l'amélioration directe de la dégradation des hydrocarbures via la sécrétion de diverses enzymes extracellulaires telles que les laccases et les peroxydases (Martin et al., 2013). D'après Khan et al. (2012), les plantes peuvent transformer les polluants organiques en une forme moins toxique, par le biais d'oxydation et / ou de réduction, par le fait de leurs propres enzymes.

Les résultats de l'élongation racinaire montrent une petite différence entre le sol cultivé avec la fève et celui cultivé avec chlorophytum, ce qui peut être liée à la quantité plus élevée d'eau retenue par ce sol.

D'après les résultats d'Ait Tayeb et Titouche (2011), la teneur du sol contaminé en humidité est beaucoup plus importante dans le sol contaminé par les hydrocarbures par rapport au sol témoin, cette augmentation de l'humidité a favorisé la croissance des racines de maïs.

Nous avons entrepris un essai de dépollution d'un sol pollué aux hydrocarbures en utilisant une plante ornementale (*chlorophytum*) afin de tester son efficacité par comparaison avec une plante légumineuse (la fève) à une capacité de dépollution importante.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que *chlorophytum* a eu le même effet que la fève sur le sol contaminé par les hydrocarbures. L'espèce n'a eu aucun effet sur la biomasse végétale, l'activité biologique, la biomasse microbienne et la conductivité électrique du sol. En revanche, le pH mesuré dans le sol cultivé avec la fève a été légèrement inférieur à celui du sol cultivé par le *chlorophytum*.

Selon les résultats du test de germination et de l'élongation racinaire, nous pouvons conclure que le *chlorophytum* a été efficace dans l'amélioration de la qualité biologique du sol. En effet, le taux de germination du maïs a été amélioré et a même atteint une valeur voisine du taux obtenu dans le sol cultivé en fève. De plus, la croissance des racines du maïs, traduite par la valeur de l'élongation racinaire, a été meilleure que celle obtenue dans le sol ayant porté les plants de fève, probablement à cause de la rétention d'une plus grande quantité d'eau révélée par l'humidité hygroscopique du sol.

Au regard de ces résultats, nous nous apercevons que la toxicité des hydrocarbures a diminué dans les sols cultivés avec les deux espèces végétales (fève et *chlorophytum*) et la qualité de ces sols a été, de ce fait, améliorée. Ceci nous permet de conclure quant à l'efficacité de *chlorophytum* dans la décontamination du sol pollué aux hydrocarbures.

Enfin, nous proposons quelques perspectives de recherche dont :

- la réalisation de ces essais de phytoremédiation sur le terrain afin de confirmer les résultats obtenus dans les expériences de laboratoire.
- la réalisation des études sur les relations sol-plante-microorganismes, ainsi que les mécanismes enzymatiques impliqués dans la dégradation et la transformation des hydrocarbures qui permettra d'optimiser les techniques de la phytoremédiation.
- l'essai d'autres espèces ornementales telles que l'iris qui est largement utilisé et avec succès dans le lagunage.

Références bibliographiques

- ARNAUD P., 2004** : Chimie organique. Edition DUNOD, Paris. p208
- BAIZE D., 2000** : guide des analyses en pédologie. 2^{ème} édition revue et augmentée. Paris. p15
- BECHABAN M. et BOUHADDA M., 2010** : Etude en vue de la mise en place d'un système de management environnemental au sein de NAFTAL selon la norme ISO 14001 cas station-service. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie, UMMTO. p18
- BENAMARA Z. et MOHAMMEDI H., 2010** : Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes et les micro-organismes du sol et essai de phytoremédiation. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie, UMMTO. p11.
- BERGUE J.L., 1986** : la pollution des sols par les hydrocarbures. p 62-64
- BOUDERHEM. A., 2011** : Utilisation des souches bactériennes Telluriques Autpctones dans la biodétection et la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures. Universitaire Kadi Merbah-Ouargla. P14
- CADIERE F. 2006** : Traitement biologique des sols pollués ; recherche et innovation. Département sites des sols pollués. Direction Déchets et sol-ADEME(Angers). p6
- CHAGNEAU C.H., MOREL J.L. et OUDOT J., 2000**: bioremediation a biodegradation. Biodegradation of fuel Oil Hydrocarbons in the rhizosphere of Maize. J. V295, pp569
- CHEVRIER E., 2013** : la phytoremédiation, une solution d'avenir pour la Québec. Mémoire en vue de l'obtention du grade de maitre de l'environnement (M. Env), Universitaire IHERBOOKE. P15-22
- COLIN FRANÇOIS., 2000** : Pollution localisées des sols et sous-sols par les hydrocarbures et les solvants chlorés. Rapport N°44, Edition Tec et Doc. Paris. p95-284, V417
- CUNY D., RZEPKA M-A., BULTEAU G., LAKEL A ET DEVRED I., 1989** : Quels rôles les plantes peuvent-elles jouer, vis-à-vis de pollution a l'intérieur des locaux. p33
- DUCHAUFOR P., 2001** : Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6^{ème} édition MASSON, Paris Milan Barcelone. p308-498
- FATTAL P., 2008** : pollution des cotes par les hydrocarbures, Presse universitaire de Rennes. p498
- INIRIS, 2012** : Institut national de l'environnement et de l'industriel et des risques : Etude de scenarios dangereux en station-service. Rapport final. p 11
- KHAN S., MUHAMMAD A. et IQBAL S., 2012**: Plant-bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. Rev. p1317-1332
- KOLLER E., 2004** : Traitement des pollutions industrielle (eau, air, déchet, sol, boues). Edition DUNOD. Paris. P280-313

Références bibliographiques

LAURENT F., CREPINEAU C., RYCHEN G., FEIDET C., FEIDET C., LE ROUX Y. et LICHTFOUSE E., 2005 Contamination of pastures by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the vicinity of a highway, journal of Agricultural and Food Chemistry. p51

MANGIN L., 1990: Nombreuses espèces de plantes aident à améliorer l'état des sols pollués : c'est la phytoremédiation. p82

MARTIN C., GEORGE J., PRICE A., RYAN H., TIBBETT M., 2013: The role of root exuded low molecular weight organic anions in facilitating petroleum hydrocarbon degradation: Current knowledge and future directions. Rev. p 642-653

NJOKU, K., AKINOLA. O. et OBEH, B. O., 2009: phytoremédiation of crude oil contaminated soil. Edition marslandpress.p80

NORINI M-P., 2007: Eco dynamique des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des communautés microbiennes dans les sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique. Thèse de Doctorat, Universitaire Henri Poincaré, Nancy I. pp75

NOWAK C. MOSSMANN J.R. et SAADA A., 2002 : Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en œuvre. Rapport BRGM/RP-51960-FR. p22-31

OUVRAD S. SIMEON N. MERCIER G. CEBRON A et LEYVAL C., 2008 : Décontamination des sols pollués par les hydrocarbures aromatiques polycycliques par biodégradation en présence de substance organique supplémentaires. Revue génie, sci, environ. Vol 7. P 467

PESSON P., 1971 : la vie dans les sols. Aspects nouveaux, étude expérimentales. Edition Gauthier-Villars, Paris. p396

PIEDRAFITA C. ET MARIA V., 2007 : la pollution ponctuelle des sols : le cas des stations-services dans la région de Bruxelles-Capitale. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du grade académique. Spécialité en Gestion de l'Environnement, Universitaire libre de Bruxelles. P18

PIMSEE P., 2014: Etude de comportement des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) lors du déversement accidentel d'hydrocarbures en eau continentales. Thèse du Doctorat de l'Universitaire de Toulouse. p16

RAMADE F., 1992: Précis d'écotoxicologie. Edition MASSOUN, Paris. p300

ROLLIN C. et DENYS S., 2005: Faisabilité de la phytoremédiation des sols de Cokerie contaminé par les hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. INERIS. Par Technologique ALATA, BP 2, 60 550 VERNEUIL en HALATTE. Edition SFGP. PARIS France. p105-90

ROUQUEROLT, AMIR H et AMIR A, 1987 : Effet de l'épandage de résidu pétrolière de raffinerie sur l'évolution de la matière organique. L'activité de densité microbienne d'un sol agricole. Revue d'écologie et de biologie du sol. P156

Références bibliographiques

SAADA A. NOWAK C. COQUEREAU N., 2005 : Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures. Rapport intermédiaire : Résultat de la phase 1. Rapport BRGM/RP-53739-FR. p23-43

SCHNOOR J.L et McCutcheon S.C., 2003 : Phytoremediation- transformation and control of contaminations. Dans Wiley- interscience, Inc, NJ, USA, p987

SOLTANI M., 2004 : Distribution lipidique et voies de décontamination métabolique chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat d'univers Paris. p284.

VANOBBERGHEN F., 2010 : la phytoremediation en Wallonie : Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminé en métaux lourds. Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement. Universitaire libre de Bruxelles. p48-53

VIDALI M., 2001: Bioremediation an overview. Pure appel. hem. p222

Annexe 1 : Poids frais et sec de la partie aérienne et racinaire de chlorophytum

espèce	poids			
	partie aérienne		partie racinaire	
chlorophytum	frais	sec	frais	sec
chlor 1	1,8	0,2	0,2	0,13
chlor 2	5,8	2	12,1	1,42
chlor 3	3,2	1,1	1,6	0,37
chlor 4	1,5	0,37	0,2	0,42

Annexe 2 : Poids frais et sec de la partie aérienne et racinaire de la fève

espèce	partie aérienne		partie racinaire	
	frais	sec	frais	sec
fève 1	9,5	1,1	2	0,4
fève 2	3,8	0,7	2,4	0,48
fève 3	13,4	1,5	1,4	0,35
fève 4	15,6	2,3	1,9	0,39

Annexe 3 : La quantité de CO₂ dégagé par le sol de chlorophytum

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
chlor 1	0,6	0,5
chlor 2	0,7	0,6
chlor 3	0,7	0,8
chlor 4	0,8	10

Annexe 4 : La quantité de CO₂ dégagé par le sol de la fève

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
fève 1	0,8	0,7
fève 2	0,4	0,9
fève 3	0,5	0,7
fève 4	0,4	0,4

Annexe 5 : La biomasse microbienne du chlorophytum

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
chlor 1	0,42	0,28
chlor 2	2,57	1,43
chlor 3	0,57	0,28
chlor 4	0,85	0,28

Annexe 6 : La biomasse microbienne de la fève

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
fève1	0,28	
fève2	1,14	0,28
fève3	1,71	0,28
fève4	1,42	1,14

Annexe 7 : Le pH du sol de chlorophytum

espèce	sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
chlor 1	7,65	7,8
chlor 2	7,8	7,76
chlor 3	7,86	7,77
chlor 4	8,12	7,75

Annexe 8 : Le pH du sol da la fève

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
fève 1	8,18	8,06
fève 2	8,16	8,03
fève 3	8,21	8,09
fève 4	8,21	8,08

Annexe 9 : La CE de la chlorophytum

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
chlor 1		0,137
chlor 2	0,765	0,331
chlor 3	0,079	0,446
chlor 4	0,369	0,548

Annexe10 : La CE de la fève

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
fève 1	0,102	0,104
fève 2	0,293	0,102
fève 3	0,193	0,255
fève 4	0,408	0,892

Annexe 11 : L'humidité hygroscopique du sol de chlorophytum

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
chlor 1	0,15%	0,20%
chlor 2	0%	0,15%
chlor 3	0%	0,25%
chlor 4	0%	0,10%

Annexe 12 : L'humidité hygroscopique du sol de la fève

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
fève 1	0,05%	0,15%
fève 2	0,05%	0,10%
fève 3	0%	0,40%
fève 4	0,05%	0,05%

Annexe 13 : Le taux de germination des graines de maïs dans le sol portant la chlorophytum

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
chlor 1	0,75%	0,75%
chlor 2	0,80%	0,95%
chlor 3	0,80%	0,95%
chlor 4	0,85%	0,95%

Annexe 14 : Le taux de germination des graines de maïs dans le sol portant la fève

espèce	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
fève 1	0,85%	1%
fève 2	0,95%	1%
fève 3	0,85%	0,80%
fève 4	0,95%	0,95%

Annexe 15 : L'élongation racinaire des graines de maïs dans le sol portant la chlorophytum

Chlor 1	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	3,3	0,1
racine 2	0,5	2,6
racine 3	0,8	0,2
racine 4	0,5	0,3
racine 5	1	3,5

Chlor 2	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	0,4	4,8
racine 2	0,6	12,8
racine 3	1	4
racine 4	0,2	5,6
racine 5	0,2	8,2

Chlor 3	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	2,2	5
racine 2	0,8	0,5
racine 3	0,2	0,7
racine 4	0,2	3,7
racine 5	0,1	0

Chlor 4	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	0,1	9,6
racine 2	0,2	3,5
racine 3	0,4	0,5
racine 4	0,1	4,5
racine 5	0,1	2,7

Annexe 16 : L'élongation racinaire des graines de maïs dans le sol portant la fève

Fève 1	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	0,4	0,5
racine 2	1,6	0,1
racine 3	0,1	3
racine 4	0,2	0,5
racine 5	0,6	0,5

Fève 2	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	2,3	9,9
racine 2	0,3	9
racine 3	0,2	4,5
racine 4	7,5	11
racine 5	6,7	1,1

Fève 3	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	15,7	1,4
racine 2	9	0,9
racine 3	3	0,5
racine 4	12,2	2,9
racine 5	1,4	0,1

Fève 4	Sol rhizosphérique	Sol non rhizosphérique
racine 1	0,3	6
racine 2	0,1	3
racine 3	0,5	0,2
racine 4	0,8	1,1
racine 5	1	0,5

Annexe17 : test de Student pour la biomasse végétal

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
BA	0.1975	1.4000	-0.9038	6	0.4009	NS
BR	0.585	0.405	0.6278	6	0.5533	NS

Annexe 18 : test de Student pour la respirométrie

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	2.975	0.700	0.9809	3.012	0.3987	NS
Sol R	0.675	0.525	1.6977	4.079	0.1634	NS

Annexe 19 : test de Student de la biomasse microbienne

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	0.5675	1.1025	0.0709	6	0.9458	NS
Sol R	0.5425	1.1375	-0.0598	6	0.9543	NS

Annexe 20 : test de Student pour le pH du sol

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	7.8575	7.77	0	6	1	NS
Sol R	8.1900	7.77	-3.366	3.094	0.04157	S

Annexe 21 : test de Student de la conductivité électrique

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	0.36550	0.40325	0.1312	6	0.8999	NS
Sol R	0.33825	0.24900	0.9937	4.254	0.375	NS

Annexe 22 : test de Student pour l'humidité hygroskopique du sol

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	17.500	16.375	0.1246	3.861	0.907	NS
Sol R	15.75	5.75	14.771	6	6.052×10^{-6}	TH S

Annexe 23 : test de Student pour le taux de germination des graines de maïs

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	90	93.75	-0.5447	5.982	0.6057	NS
Sol R	80	90	-2.8284	5.4	0.03371	S

Annexe 24 : test de Student pour l'élongation racinaire des graines de maïs

	chlor	fève	t	df	p-value	S(*)
Sol NR	4.51250	3.40625	1.8113	6	0.1201	NS
Sol R	3.75625	0.75625	-4.1131	3.829	0.01606	S

Résumé

L'objectif de notre travail est de tester l'efficacité des plantes ornementales dans la dépollution d'un sol pollué aux hydrocarbures en les comparant à une espèce dont l'efficacité a été démontrée, à savoir la fève (*Vicia faba* L) et ce en étudiant les effets de la cultures de ces deux espèces sur un sol contaminé.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que *chlorophytum* a eu le même effet que la fève sur le sol contaminé par les hydrocarbures. L'espèce n'a eu aucun effet sur la biomasse végétale, l'activité biologique, la biomasse microbienne et la conductivité électrique du sol. En revanche, le pH mesuré dans le sol cultivé avec la fève a été légèrement inférieur à celui du sol cultivé par le *chlorophytum*, et ainsi le *chlorophytum* a été efficace dans l'amélioration de la qualité biologique du sol. En effet, le taux de germination du maïs a été amélioré et a même atteint une valeur voisine du taux obtenu dans le sol cultivé en fève et la croissance des racines du maïs, traduite par la valeur de l'élongation racinaire a été meilleure que celle obtenue dans le sol ayant porté les plants de fève.

Abstract

The aim of our study was to test efficacy some plant ornamental of depollution of a ground to pollute with hydrocarbons in the appeared to species of with efficacy to summer demonstrate, to namely fève (*Vicia faba*) and it student the effect of farming tow species in ground contaminated.

According to the results obtained, we can conclude that *chlorophytum comosum* in same effect that fève on ground contaminated with hydrocarbons. To Species no effect on boimass vegetable, activity biological, microbial biomass, conductivity electrical of ground. Revenge, the pH moderate in ground cultivated with fève summer lightly inferior the one ground cultivated by *chlorophytum*, and the *chlorophytum* summer efficacy in improvement of quality biological the ground. In effect, the percentage germination maize summer improved and same attained value neighbor percentage obtained in ground cultivated with fève and a growth some root maize, a reduction by value of slope root in summer bather then as obtained in ground inclined the plant fève.