

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 Agronomiques

Département de Biologie Animale et Végétale

Mémoire

En vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Biologie

Spécialité : Protection de l'Environnement

Sujet

**Essai de phytoremédiation d'un sol
pollué aux carburants et valorisation des
plantes par production de biocarburants**

Présenté par :

M^{elle} NAIT MESSAOUD Thamila

M^{elle} SAMER Zaina

Devant le jury :

Présidente : M^{me} SADOUDI DJ.

Promotrice: M^{elle} ALI AHMED S.

Examineurs : M^{me} TALEB K.

M^r SADOUDI R.

P^r à l'U.M.M.T.O

M. A. A. à l'U.M.M.T.O

M. C. B. à l'U.M.M.T.O

M. C. B. À l'U.M .M.T.O

Soutenu le 15/06/2015

Remerciements

Nous commençons par remercier Dieu le Tout Puissant pour nous avoir donné le courage, la volonté, l'amour du savoir et surtout la patience pour pouvoir produire ce modeste travail.

C'est pour nous autant de plaisir qu'un devoir d'exprimer notre gratitude et notre reconnaissance à M^{elle} ALI AHMED S., Maitre Assistante A à la FSBSA de l'UMMTO, qui nous a orientées et guidées afin de mener à bien ce travail.

Nous remercions aussi très sincèrement les membres du jury ; la présidente M^{me} SADOUDI D., Professeur à la FSBSA de l'UMMTO, et les examinateurs M^{me} TALEB K, Maitre de Conférences B à la FSBSA de l'UMMTO, et M^r SADOUDI R., Maitre de Conférences B à la FSBSA de l'UMMTO, pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous voudrions aussi témoigner notre reconnaissance et exprimer toute notre gratitude à M^r CHAOUCHI, M^{me} SAHMOUNE, M^r AMIR et plus particulièrement M^{me} SADOUDI, ainsi que les ingénieurs des laboratoires communs I et II. A nos enseignants qui ont participé à notre formation.

Enfin, nous tenons à remercier 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 que dieu tout puissant me les garde.

A mon très cher frère et sœur ;

A mon cher époux Aziz ;

A ma chère princesses niella ;

A ma chère grand-mère ;

A ma chère belle famille ;

A ma meilleur amie thamila avec qui j'ai partagé ce travail et toute sa famille ;

A tous mes amis(es) surtout LYDIA, SOUAD ;

A Tous ceux et celles que j'aime et que me sont chers.

SAMER ZAINA



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

A mon cher père qu'il repose en paix ;

A ma chère mère qui m'a beaucoup aidé et soutenu durant toutes mes années d'études que dieu me la garde. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent pas de me combler ;

A ma sœur OUARDA, ces enfants, sa belle mère et à son époux ;

A mes très chères sœurs FAIROUZ , HYDRA ;

Sans oublier HOCINE et toute ma famille ;

A mon cher bien aimé ;

A ma meilleure Amie ZAINA avec qui j'ai partagé ce travail et toute sa famille ;

A tous mes amis surtout LYNDA, AGHILES, DJAMEL et WAEL

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit réalisé ;

Avec mes sincères remerciements.

NAIT MESSAOUD THAMILA

Liste des abréviations

A.D.E.M.E : Agence De l'Environnement et de La Maitrise de l'Energie.

BLC : biomasse lignocellolusique

CE : conductivité électrique.

C_{org} : carbone organique.

HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique.

N_{tot} : azote totale.

P : phosphore.

UMMTO : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.



Sommaire

La liste des tableaux

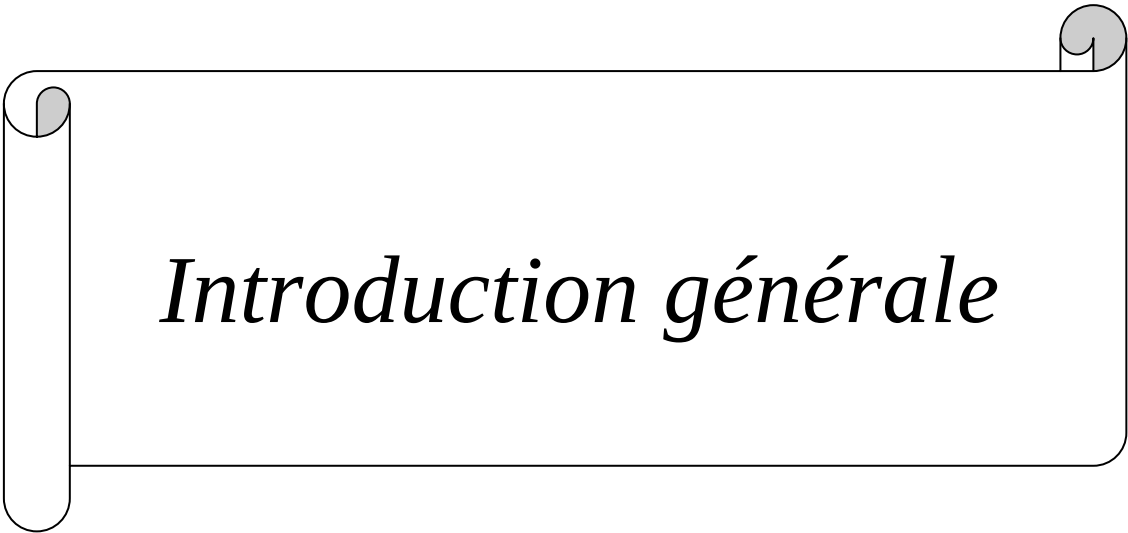
Tableau 1 :	présentation des différentes phytotechnologies	8
Tableau2 :	résultats des analyses chimiques du sol.....	15

La liste des figures

Figure 1 :	les deux filières des biocarburants de première génération (Berthier et al.,2013)	9
Figure 2 :	Principales étapes de la transformation de l'amidon en éthanol par l'hydrolyse enzymatique et fermentation (Debiton, 2010).....	11
Figure 3:	Voies de production des biocarburants de 2 ^{ème} génération (Berthier et al.,2013)	13
Figure 4:	Schéma de production des Biocarburants de 3ème génération (Derbali, 2007).....	13
Figure5 :	Le Maïs (Samer et Nait Messaoud, 2015)	15
Figure6 :	Le pois (Samer et Nait Messaoud, 2015)	16
Figure 7 :	distillateur (Samer et Nait Messaoud, 2015)	19
Figure 8:	Taux de levée du maïs et du pois dans le sol contaminé et le sol témoin.....	21
Figure 9 :	hauteur du pois dans le sol contaminé et le sol témoin.....	23
Figure 10:	Biomasse végétale du maïs et du pois dans un sol contaminé et un sol témoin.....	25
Figure 11:	volume racinaire du maïs et du pois dans un sol contaminé et un sol témoin.....	27

Figure 12 : le nombre de nodules actif et non actif du pois.....29

Figure 13 : Nombre de nodules actif dans un sol témoin et contaminé.....30



Introduction générale

*Références
bibliographiques*

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Aperçu bibliographiques

I. Pollution du sol par hydrocarbures	3
I.1 Définition des hydrocarbures	3
I.2 Classification des hydrocarbures	3
I.3 Principales sources de contamination du sol par les hydrocarbures	4
I.4. Devenir des hydrocarbures dans le sol	5
I.5 Les effets des hydrocarbures sur les êtres vivants et l'environnement	6
I.6. Méthodes de réhabilitation des sols pollués	7
II. Généralités des biocarburants	9
II.1 Définition des biocarburants.....	9
II.2 Type de biocarburants	9
1 Les biocarburants de 1 ^{ère} génération	9
2 Les biocarburants de 2 ^{ème} génération	10
3. Les biocarburants de 3 ^{ème} génération	10
II.3 Procédés de fabrication	10
1 Procèdes de fabrication des biocarburants 1 ^{er} générations	10
2 Procédés de fabrication des biocarburants de 2 ^{ème} génération	12
3 Procédés de fabrication des biocarburants 3 ^{ème} génération	13

Chapitre II : Matériels et méthodes

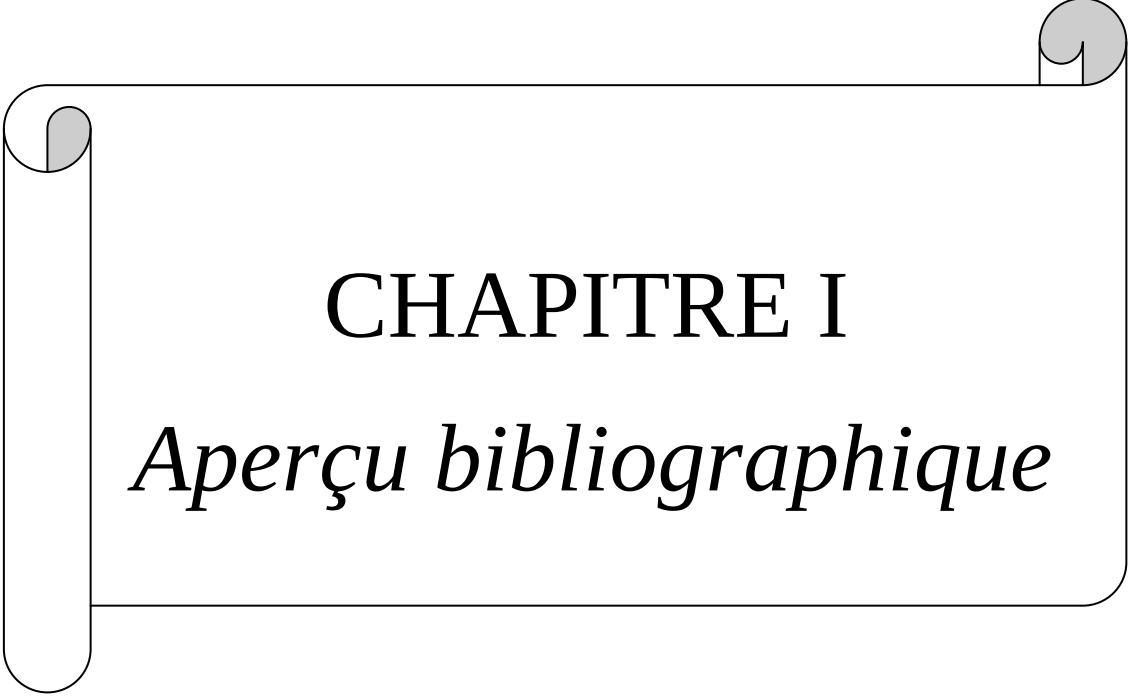
1I.1 Matériels	15
II.2 Méthodes	17
II.3 Effets des hydrocarbures sur les plantes	18
II.4 Production des biocarburants	19
II.5 Méthodes d'analyse statistique	20

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Effets des hydrocarbures sur le végétal	21
III.2 Valorisation des plantes par la production de biocarburants.....	31

Conclusion	33
-------------------------	----

Bibliographie	35
----------------------------	----

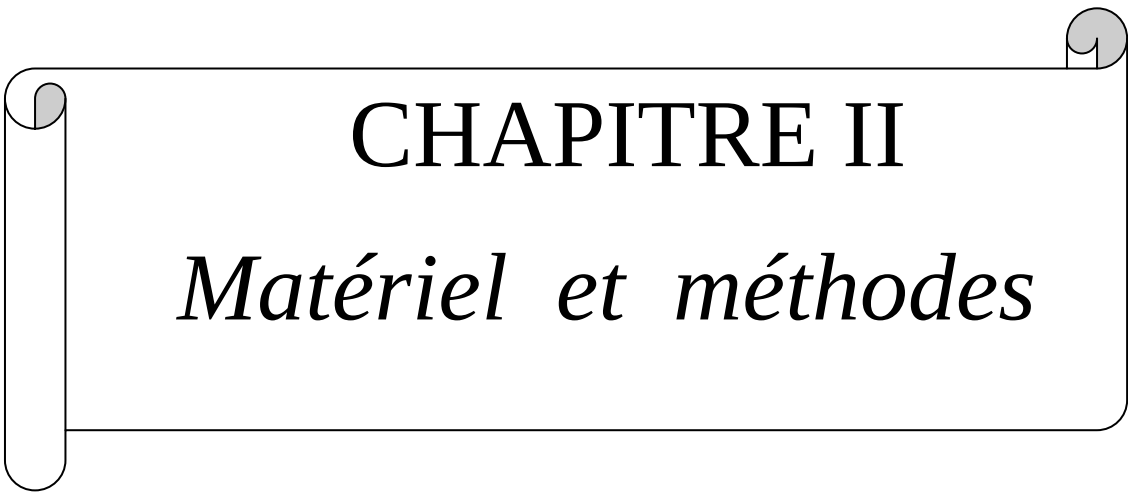


CHAPITRE I

Aperçu bibliographique



Annexes

A decorative horizontal scroll graphic with a light gray fill and a dark gray border. It features rounded ends and a small circular detail on the left side. The text is centered within the scroll.

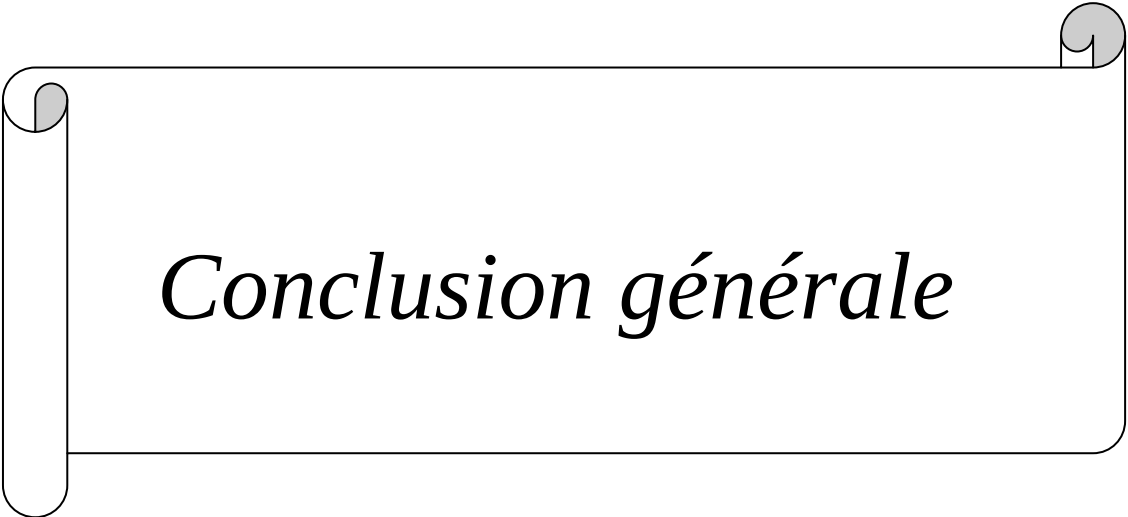
CHAPITRE II

Matériel et méthodes

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and rounded ends. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a light gray shadow. The text is centered within the scroll.

CHAPITRE III

Résultats et discussion

A decorative scroll frame with a light gray background and a dark gray border. The frame has a vertical strip on the left side and a small circular element at the top right corner.

Conclusion générale

ANNEXE

Annexe 1 : Taux de levée du maïs dans un sol contaminé et un sol témoin.

pots	Taux de levé dans le sol témoin	Taux de levé dans le sol contaminé
1	100%	73 ,33%
2	100%	60%
3	100%	53,33%

Annexe 1 : Taux de levée du pois dans un sol contaminé et un sol témoin.

pots	Taux de levé dans le sol témoin	Taux de levé dans le sol contaminé
1	100%	65%
2	100%	64,76%
3	100%	33,33%

Annexe 2 : Hauteurs moyennes du maïs par semaines en cm sur un sol contaminé et un sol témoin.

Durée Sol	semaine 7	semaine 8	semaine 9	semaine 10
témoin	49,43	51,2	53,12	56 ,75
Contaminé	24,57	27,39	30,07	30,98

Annexe 3 : Hauteurs moyennes du pois par semaines en cm sur un sol contaminé et un sol témoin.

Durée Sol	semaine 7	semaine 8	semaine 9	semaine 10
témoin	26,77	31,5	38,89	47,5
Contaminé	23,81	26,52	30,49	34,54

ANNEXE

Annexe 4 : Biomasse végétale moyennes des plants du pois et du maïs sur sol témoin et sol contaminé.

Biomasse végétale en g	Maïs		Pois	
	témoin	contaminé	témoin	contaminé
	18,33	6,33	3,5	0,98

Annexe 5: volumes racinaire moyen du maïs et du pois dans un sol témoin et sol contaminé.

Volume racinaire en ml	Maïs		pois	
	témoin	contaminé	témoin	contaminé
	3,33	7,56	0,43	1,3

Annexe 6: Nombre moyen des nodules actifs et non actifs dans un sol témoin et un sol contaminé.

Sols nodules	témoin	Contaminé
Non actifs	20	18
Actifs	42	13

Notre travail a été réalisé au laboratoire de pathologie des écosystèmes de la faculté des sciences biologiques et des sciences agronomiques de l'UMMTO. Nous avons réalisé une culture en pots pour deux espèces maïs et pois pour évaluer leur résistance à la pollution lors d'un essai de phytoremédiation. Ce travail contient aussi un essai de valorisation de ces plantes par la production de biocarburants.

II.1 Matériels

II.1.1 Le sol

L'étude expérimentale a été réalisée sur un échantillon de sol provenant d'une station service du Boukhalfa. C'est un sol contaminé par deux carburants ; l'essence et le gasoil. Ces derniers présentent une densité < 1 et s'accumulent à la surface des nappes.

Les essences sont composées de n-alcanes, d'isoalcanes, de cycloalcanes, d'alcènes et d'aromatiques. Le gasoil contient environ 2000 à 4000 hydrocarbures différents. Il est constitué essentiellement de n-alcanes et de cycloalcanes et ne contient pas d'alcènes (Saada et al., 2005).

Ce sol a été caractérisé au laboratoire de pédologie de l'INRF de BAINEM (tableau 2).

Tableau 2 : caractéristiques physico-chimiques du sol (Kahil et Issad, 2014).

	Résultats	Normes (DIAEA/DRHA/SEEN, 2008)
pH	7.2	pH neutre 6.5 – 7.3
CE	0.74 (mmhos/cm)	Non salé $< 4\text{mmhos/cm}$
C _{org}	8.84%	Riche en MO $> 6\%$
N _{tot}	0.3%	/
P(P ₂ O ₅)	5.46ppm (mg P ₂ O ₅ /Kg sol)	Pauvre en P ₂ O ₅ < 15
Texture	Limono-argileuse	Triangle des textures

Le sol utilisé dans notre expérience est d'une texture limono-argileuse ce qui signifie que c'est un sol lourd d'une forte capacité de rétention en eau. C'est un sol de pH neutre, non salé, riche en carbone organique et faiblement pourvu en azote et en phosphore (P₂O₅).

II.1.2 Pots

Les pots utilisés pour la culture du maïs et du pois sont des pots de 8 cm de diamètre et 9 cm de hauteur.

II.1.3 Matériel végétal

Pour étudier les effets des hydrocarbures, nous avons utilisé le pois qui présente un bon potentiel de phytoremédiation et caractérisé par un système racinaire très développé (Duchauffour, 2001) et le maïs qui a la capacité de dégrader ou d'accumuler les polluants (Dupont, 2010).

II.1.3.1 Le Maïs

Le maïs (*Zea mays* L.) (figure 7) est une plante tropicale herbacée annuelle de la famille des graminées (Poacées). Il est largement cultivé comme céréale pour ses grains riches en amidon et représente la première production des céréales devant le riz et le blé (Anzala, 2006). Le s'est revelier efficace dans la dépollution du sol par les hydrocarbures (Mahlal et Moula (2011) ; Ould Rabah (2012).



Figure5 : Le Maïs (Samer et Nait Messaoud, 2015)

La taille de la tige de maïs est variable, de 40 cm à 10 m ; les feuilles à limbes allongées et à nervures parallèles. La graine de maïs est formé d'un embryon, d'un tissu de réserve, l'albumen et d'une enveloppe fine et translucide, le péricarpe.

Le système racinaire du maïs est composé d'un grand nombre de racines adventives situées sur les nœuds à la base de la tige. Il est caractérisé par des racines traçantes (dites racines de surface), qui prélèvent l'eau et les nutriments nécessaires à la plante dans les couches les plus superficielles du sol.

Le maïs est cultivé pour l'alimentation humaine et animale mais aussi pour de nombreuses utilisations dans l'industrie textile, pharmaceutique (amidon du maïs), dans la production de plastique biodégradable et de biocarburant (Anzala, 2006).

II.1.3.2 Le pois

Le pois (*Pisum sativum* L.) est une plante de la famille des Fabacées, sous famille des Papilionacées. Originaire d'Asie centrale. Il fait partie des légumes cultivés les plus anciens (figure 8). Les pois secs se présentent souvent sous forme de pois cassés. Les pois frais sont plus couramment appelés « petit pois » (Peron, 2004).



Figure6 : Le pois (Samer et Nait Messaoud, 2015)

C'est une plante herbacée dont la taille varie de 0,50 à 2 mètres, selon les variétés. Sa racine pivotante est longue et fournit de nombreuses racines latérales sur lesquelles se développent des nodosités. Les tiges dressées portent des feuilles pennées, aux folioles ovales. À l'extrémité des feuilles, une vrille ramifiée permet aux variétés les plus hautes (pois à rames) de s'agripper sur un support.

Le pois est généralement cultivé pour l'alimentation humaine, en raison de sa valeur alimentaire. Il est riche en provitamine A, vitamine B et C. mais ce sont surtout les hautes teneurs en protéines et hydrates de carbone qui leur confèrent leur valeur énergétique (Peron, 2004).

II.2 Méthodes

II.2.1 Préparation du sol

Le sol utilisé pour la culture, a été tamisé à l'aide d'un tamis à mailles de 5 mm de diamètre puis reparti sur 6 pots dont 3 seront cultivés par le maïs, 3 par le pois.

II.2.2 Le semis

Le semis a été réalisé le 21/01/2015 pour les deux espèces. Nous avons semé 15 graines de maïs par pot et 5 graines de pois par pot.

L'observation et le suivi de l'évolution de l'état des cultures est quotidien, avec un arrosage régulier pendant une durée de 10 semaines.

II.2.3 Effets des hydrocarbures sur les plantes

Afin d'évaluer les effets des hydrocarbures sur les deux espèces et la résistance de celles-ci à la pollution, nous avons procédé à la mesure de quelques indicateurs de croissance : taux de levée, hauteur des plants, biomasse végétale, volume racinaire, nombre et activité de nodules.

II.2.3.1 Taux de levée

Il consiste à établir un pourcentage de levée dans chaque pot en dénombrant les plants levés.

$$\text{Taux de levée \%} = (\text{nombre des plantes levées} / \text{nombre total des graines semées}) \times 100$$

II.2.3.2 Hauteur des plants

Elle consiste à mesurer en centimètres (cm) à l'aide d'une règle graduée, la croissance en longueur des plantes. La mesure est hebdomadaire.

II.2.3.3 La biomasse végétale

À la fin de la culture, les plantes de chaque lot ont été pesées après séchage à l'étuve à 40°C.

II.2.3.4 Le volume racinaire

A la fin de la culture, après rinçage des racines, nous les avons mises dans une éprouvette contenant un volume v_0 d'eau. Après avoir plongé les racines dans l'éprouvette, le niveau d'eau est monté à un volume v_1 et le volume des racines v est obtenu par soustraction.

$$v = v_1 - v_0$$

II.2.3.5 Nombre de nodules par plant du pois

Il s'agit de dénombrer les nodules sur les racines de chaque plantes pour évaluer l'effet des hydrocarbures sur la nodulation.

II.2.3.6 Activités des nodules

Elle consiste à recenser les nodules actifs. Ils sont reconnus par l'appariation de la couleur rouge après avoir fait une coupe au niveau des nodules. Cette couleur rouge indique la présence d'une chromoprotéine (lég'hémoglobine)

II.3 Production des biocarburants

Dans notre expérience nous avons opté pour un essai de production de bioéthanol par la voie biochimique. Ce choix a été fait en tenant compte de sa faisabilité et de la disponibilité du matériel.

II.3.1 Différentes étapes de la production du bioéthanol

II.3.1.1 Broyage

Le broyage de la biomasse ligno-cellulosique a été réalisé dans un mortier afin de déstructurer les liaisons entre les différentes composantes de la biomasse ligno-cellulosique (BLC).

II.3.1.2 Préhydrolyse

C'est un prétraitement qui vise à séparer et rendre accessible les constituants de la biomasse ligno-cellulosique : lignine, hémicellulose et cellulose par une action chimique. De l'acide sulfurique à 0.3% est ajouté à la biomasse puis chauffé au bain-Marie à une température de 100 à 200°C pendant 15min.

II.3.1.3 Hydrolyse

Cette opération est réalisée à l'aide d'un acide sulfurique dilué à 0.5%, à une température de 200°C pendant seulement 5 min pour éviter la dégradation des sucres et la formation de furfural.

II.3.1.4 Fermentation

La fermentation éthylique se fait grâce à la levure de boulanger *Saccharomyces cerevisiae* qui est capable de convertir le glucose. De bonnes productions d'éthanol ont été obtenues également avec la souche *Escherichia coli* (Ballerini, 2006). L'association des deux (la levure et la bactérie) permet un meilleur rendement. La fermentation a duré 72 heures.

II.3.1.5 Distillation

Le montage de distillation est constitué d'un ballon à fond rond de 1L, placé dans un chauffe ballon, et relié la tête de distillation par une colonne de Vigreux qui possède des pics qui convergent vers l'intérieur, obligeant les vapeurs à parcourir une distance plus longue, ce qui permet une meilleure séparation entre les composés. Afin de récupérer l'alcool, nous avons versé la suspension dans le ballon et laissé chauffer pendant 15min.



Figure 7 : Montage de distillateur utilisé (Samer et Nait Messaoud, 2015)

II.3.2 Ethylo test

Le dichromate de potassium est utilisé comme oxydant dans les éthylo tests. En effet, l'éthanol est un alcool primaire qui, en présence d'un excès d'oxydant, s'oxyde en acide éthanoïque . L'ion dichromate est orangé et sa couleur passe au vert avec la réaction, indiquant par là la présence d'alcool.

II.4 Méthodes d'analyse statistique

L'analyse paramétrique effectuée pour les indicateurs de la croissance végétale des deux espèces repose sur la comparaison d'une moyenne à une valeur standard qui correspond aux valeurs obtenues pour les mêmes espèces sur un sol non contaminé (Student à un échantillon). L'analyse est réalisée avec le logiciel R.3.0.2.

III.1. Effet des hydrocarbures sur le végétal

1.1. Taux de levée

La levée des graines a été observée à partir du 10^{ème} jour après le semis. La comparaison de ces résultats avec les valeurs obtenues antérieurement pour ces mêmes espèces sur un sol non contaminé est présentée dans la figure 8.

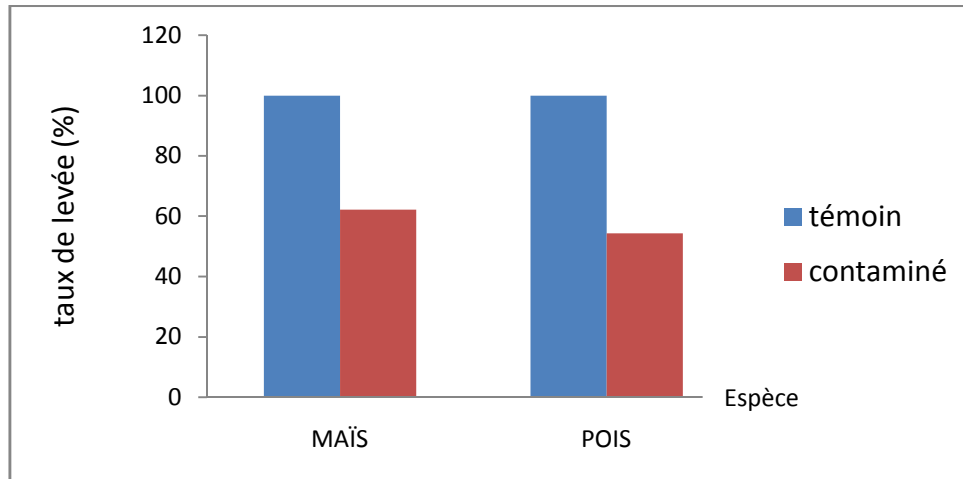


Figure 8: Taux de levée du maïs et du pois.

La levée du maïs a atteint 62,22 % dans le sol contaminé, ce qui représente un taux moyen quand on sait que cette espèce peut lever à 100 % dans un sol non contaminé.

Pour le pois, la levée enregistrée a été de 54,36 %, valeur qui est loin des 100% que cette espèce atteint habituellement dans un sol non pollué.

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il y avait des différences significatives, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont induit un taux de levée du maïs inférieur au taux atteint dans des conditions normales.

mμ	t	p-value	df	moyenne
0	-6.426	0.02337	2	62.22

Le test de Student pour un échantillon comparé à un standard a révélé qu'il y a une différence significative, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont induit un taux de levée du pois inférieur à celui du témoin.

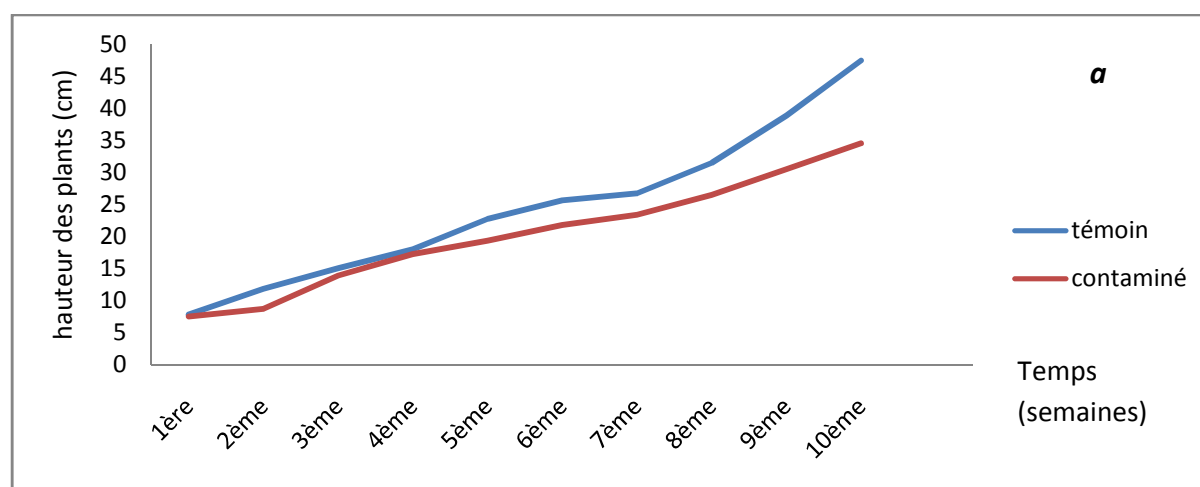
mμ	t	p-value	df	moyenne
0	-4.3394	0.04922	2	54.36

D'après les résultats de l'analyse paramétrique, nous estimons que les hydrocarbures présents dans le sol (essence et gasoil) ont eu un effet dépressif sur la germination des graines du maïs et du pois. La réduction du taux de levée dans le sol contaminé peut être due aux effets des hydrocarbures sur les propriétés du sol, qui vont se traduire par une inhibition ou une réduction de la germination des graines. Elle peut être due aussi à l'effet que ces substances peuvent exercer sur les réactions métaboliques se déroulant dans les graines. En effet, Udo et Fayemi (1975) *in* Chaineau et *al.* (1997) notent que les hydrocarbures peuvent entrer dans la graine, altérer les réactions métaboliques ou bien tuer l'embryon au contact direct.

Malgré cette diminution du taux de levée, les deux espèces ont montré une aptitude à germer dans un sol fortement pollué par les carburants. Ceci témoigne de leur aptitude à résister à cette pollution. Ce comportement n'est pas étranger à ces plantes surtout le maïs connu pour sa capacité à supporter la pollution du sol par les hydrocarbures. En effet, Chaineau et *al.* (1997) ont montré que la majorité des graminées telles que le maïs ont la capacité de tolérer la pollution par les hydrocarbures.

1.2. Hauteur des plants

La figure 11 illustre l'évolution de la hauteur des plants du maïs et du pois respectivement dans un sol contaminé en comparaison avec la croissance qu'ont ces plantes sur un sol témoin.



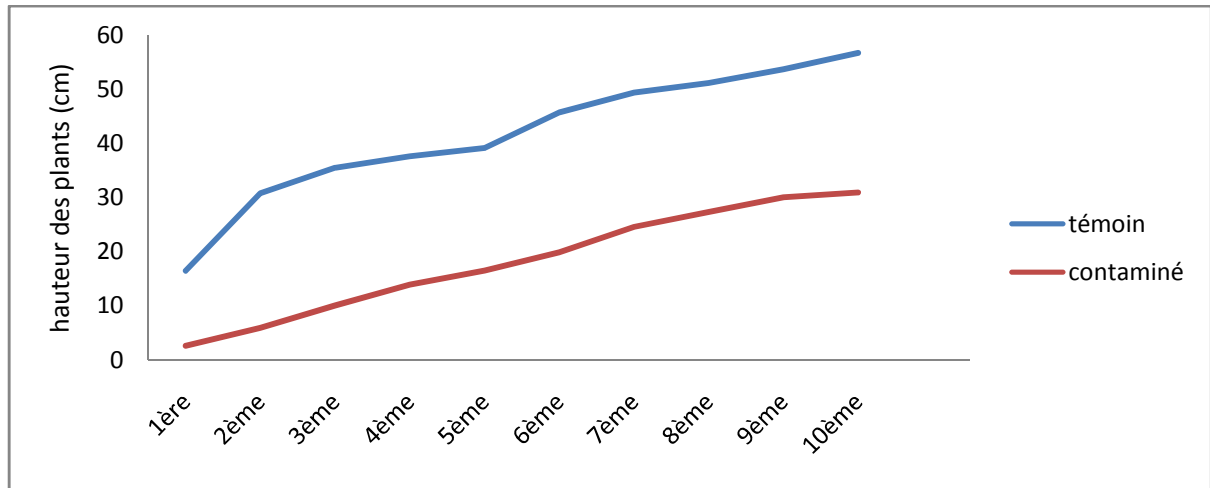


Figure 9: hauteur du maïs et du pois dans le sol contaminé et le sol témoin.

Nous avons constaté qu'au bout de la dixième semaine de culture, le maïs a atteint 30,98cm alors que, d'après les résultats de Moula et Mahlal (2011) il peut croître jusqu'à atteindre une hauteur de 56,75cm dans un sol non contaminé.

Concernant le pois, la hauteur moyenne enregistrée sur dix semaines après le semis est de 34,54cm, soit environ 13cm de moins que la hauteur atteinte par cette espèce dans le sol non pollué d'après les résultats de Oukaci et Lekadir (2014).

Le test de Student à un échantillon a révélé qu'il y avait une différence très hautement significative entre la hauteur moyenne du maïs et celle enregistrée dans les travaux antérieurs. Ceci indique que les contaminants (essence et gasoil) ont un effet négatif sur la hauteur du maïs.

mμ	t	p-value	df	moyenne
56.75	-59.92	0.00027	2	34.98

Pour ce qui est du pois, le test de Student pour un échantillon comparé à un standard a révélé qu'il y a une différence significative, ce qui indique que les contaminants ont un effet négatif peu prononcé sur la croissance du pois.

mμ	t	p-value	df	moyenne
47.54	-4.7229	0.04203	2	34.54

D'après les résultats représentés dans les figures 11, nous avons constaté que les hydrocarbures ont eu un effet inhibiteur sur la croissance des deux cultures. Ces résultats peuvent être dus à l'effet des hydrocarbures sur la disponibilité des éléments nutritifs et sur les propriétés du sol. Selon Giddens (1975), quelque soit la concentration en hydrocarbures, la croissance des plantes telle que le maïs est réduite. Cette réduction serait due à un manque d'assimilation d'eau et d'éléments nutritifs.

Chaîneau et *al.* (1997), ont associé la réduction de la croissance des plantes lors d'une contamination du sol par les hydrocarbures au déficit nutritif causé par la présence de ces polluants. D'après Chaîneau et *al.* (2000), la phytotoxicité des hydrocarbures provoque une inhibition sur une longue période du développement de la végétation.

Toutefois, l'effet observé dans notre expérience est plus marqué chez le maïs que chez le pois. Selon Duchaufour (1997), les hydrocarbures perturbent la croissance des végétaux, mais leur phytotoxicité dépend de la dose, du type de molécule et des espèces végétales.

1.3 Biomasse végétale

La figure 14 présente la biomasse végétale dans le sol contaminé en comparaison avec les valeurs obtenue habituellement sur le sol non pollué.

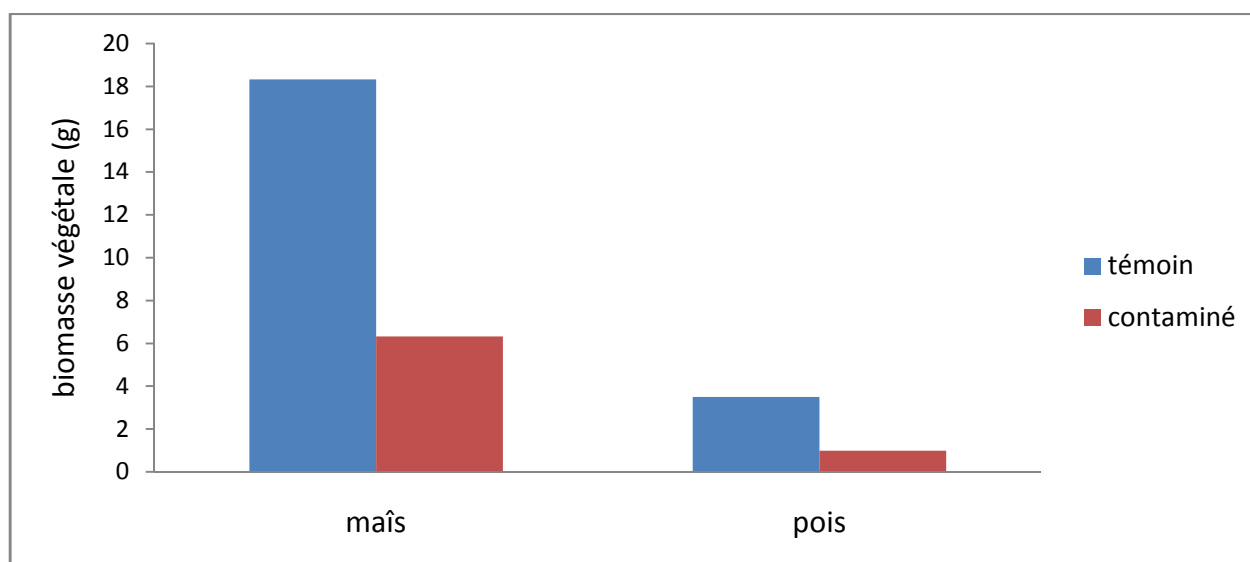


Figure 10: Biomasse végétale du maïs et du pois.

La biomasse végétale du maïs (6,33g) est trois fois plus faible que celle que cette espèce est capable d'atteindre dans un sol non contaminé.

La biomasse végétale du pois (0,96g) est quatre fois plus faible que la valeur obtenue antérieurement dans un sol sain.

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il y avait une différence significative, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont un effet négatif sur la biomasse du maïs.

m _p	t	p-value	df	moyenne
18.99	-4.6183	0.04383	2	6.33

Le test de Student à un échantillon a révélé qu'il y avait une différence hautement significative, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont un effet négatif sur la biomasse du pois.

m _p	t	p-value	df	moyenne
3.92	-21.07	0.0022	2	0.96

D'après les résultats obtenus nous avons constaté que l'essence et le gasoil ont un effet toxique sur la biomasse végétale.

La biomasse végétale est un critère de mesure du rendement au niveau de sol contaminé par les hydrocarbures. L'effet toxique des hydrocarbures s'exprime par une diminution de la biomasse (Chaineau et *al.*, 1997). La réduction de biomasse végétale du maïs dans le sol contaminé par les hydrocarbures est peut être due à l'effet toxique que ces derniers peuvent exercer sur les caractéristiques physico-chimiques du sol.

Selon Heller (1998), la réduction de la biomasse est reliée directement au sol qui est la source d'une grande partie des éléments nécessaires au développement des végétaux.

En effet, Duchaufour (1995), a noté que l'azote jouait un rôle important dans la nutrition et le développement du végétal (la croissance et le rendement). Chaineau et *al.* (1997) ont confirmé que l'effet toxique des hydrocarbures sur la plante se traduisait par une réduction significative de la croissance.

1.4. Volume racinaire

Le volume racinaire du maïs et du pois dans un sol témoin et contaminé présenté par la figure 11.

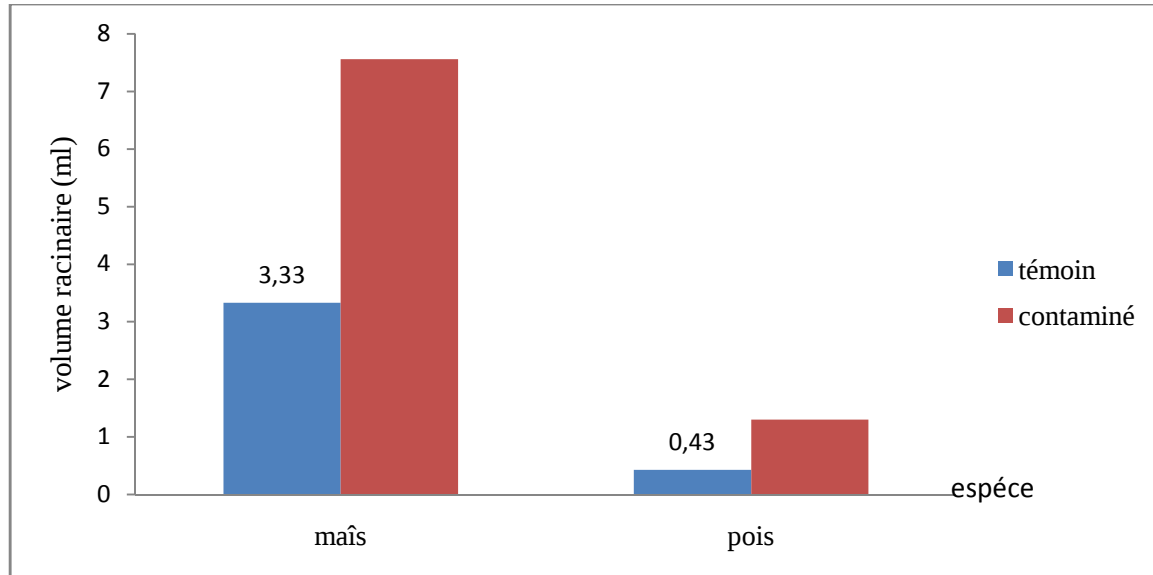


Figure 11: volume racinaire du maïs et du pois dans un sol contaminé et un sol témoin.

Le maïs présente un volume racinaire de 7,56ml; une valeur qui est supérieure à celle que cette plante peut atteindre dans un sol non pollué, ce qui explique que le système racinaire du maïs est stimulé par la présence des carburants.

Le pois présente un volume racinaire de 1,3ml qui est également supérieur à celui atteint habituellement dans un sol sain, ce qui expliquerait la résistance du pois aux hydrocarbures.

Le test de Student pour un échantillon a révélé l'absence de différences significatives entre le volume racinaire moyen du maïs et la valeur de référence qu'il atteint dans le sol non contaminé.

mμ	t	p-value	df	moyenne
3.33	4.15	0.053	2	7.56

Le test de Student à un échantillon a révélé une différence non significative. Ce qui indique qu'il n'y a pas de différence entre le volume racinaire du pois obtenue dans notre essai et celui rapporté dans la bibliographie dans le cas d'un sol non pollué.

μ	t	p-value	df	moyenne
0.43	1.42	0.29	2	1.3

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la présence des hydrocarbures dans le sol ne porte pas atteinte au développement racinaire. Ce qui permet au système racinaire d'avoir un meilleur développement avec de nombreuses ramifications dans un sol contaminé. Ceci peut être corrélé avec une bonne structure du sol.

D'après Mettaur et *al.* cités par Fezzani et Khider (2008), les hydrocarbures peuvent améliorer la stabilité structurale du sol.

1.5. Nombre de nodules

Le nombre de nodules sur les racines du pois et leur activité en comparaison avec les valeurs références obtenues dans les sols sains est présenté par la figure 20.

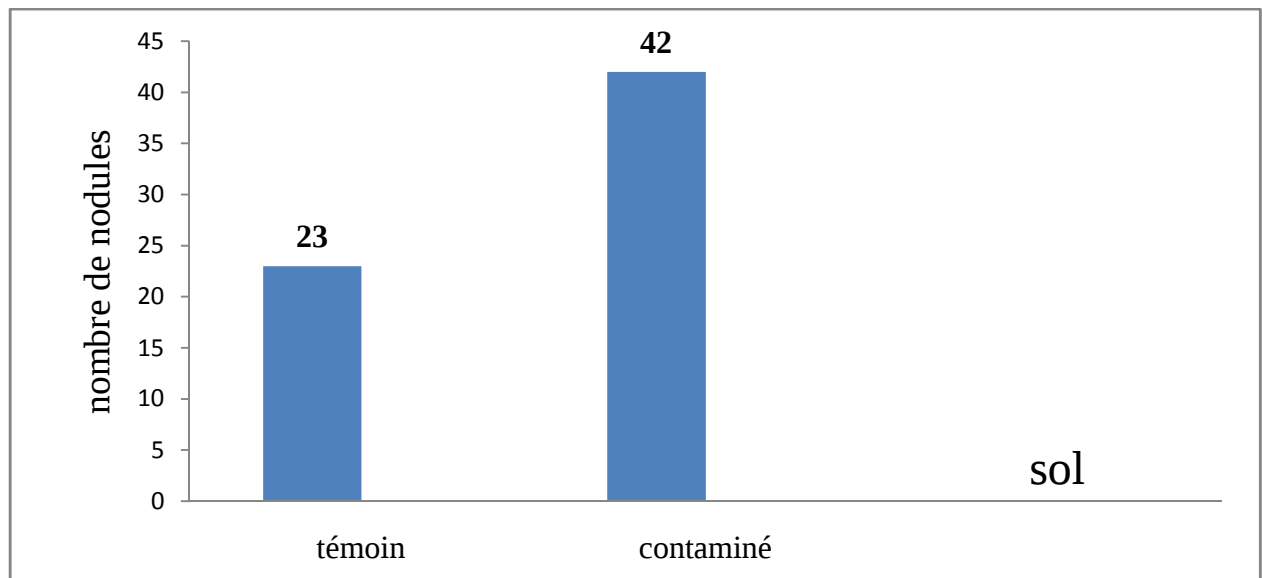


Figure 12 : le nombre de nodules actif et non actif du pois.

Le nombre de nodules enregistré est de 42 dans un sol contaminé représente quasiment le double du nombre de nodules que présente cette espèce dans un sol non pollué.

μ	t	p-value	df	moyenne
42	-17.55	0.83	2	6.16

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il n'y avait pas de différence significative entre le nombre de nodules enregistré sur les racines du pois et le nombre qui est obtenu dans un sol sain.

D'après ces résultats, nous constatons que l'effet des hydrocarbures est non significatif sur le nombre de nodules.

Nos résultats concordent avec ceux obtenus par Chaib (2014) qui a observé que le pétrole brut à 5% n'avait pas d'effet sur le processus de nodulation.

1.6. Nombre de nodules actifs

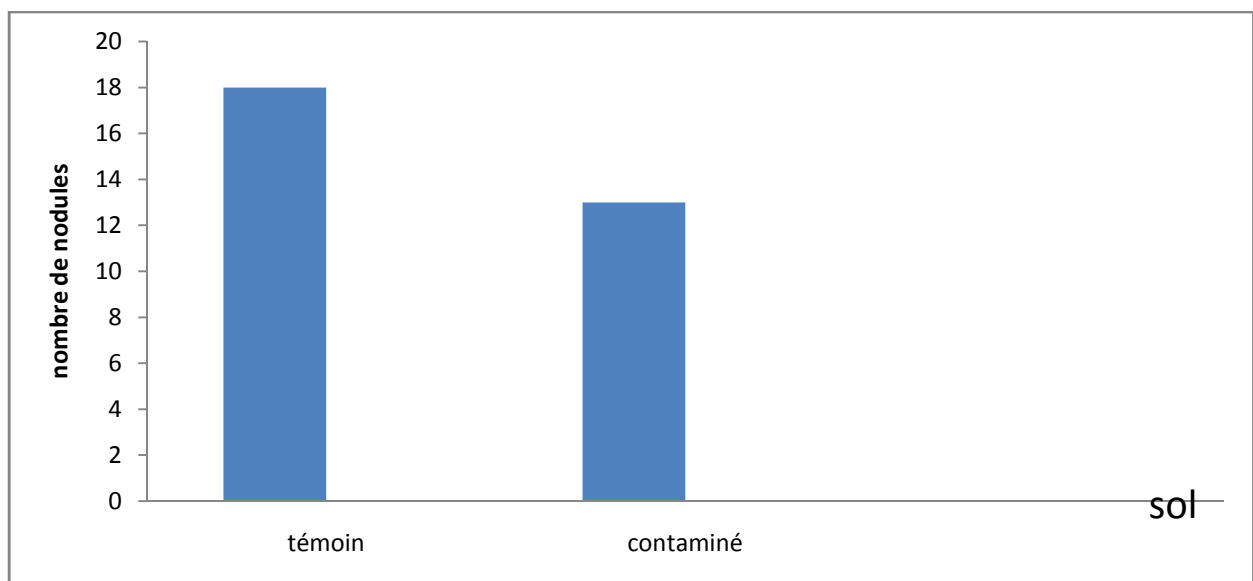


Figure 13 : Nombre de nodules actif dans un sol témoin et contaminé.

Nous avons enregistré 13 nodules actifs dans un sol contaminé alors que dans les études précédentes le nombre de nodules enregistrés dans le sol sain est de 18.

μ	t	p-value	df	moyenne
18	-15	0.042	1	12.5

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il y a une différence significative, entre le nombre de nodules actifs présents sur les racines du pois dans le sol contaminé et la valeur référence enregistrée dans le sol non contaminé figure 23.

Nous pouvons suggérer que la faible fixation d'azote est reliée soit à la détérioration des nodules au bien au manque d'oxygène ou encore à l'absence de légghémoglobine, à cause de l'effet des hydrocarbures car l'apparition de la couleur rougeâtre dépend de l'oxygène et de la chromoprotéine. Heller (1998) a noté que la fixation exigeait la présence de la légghémoglobine dont la synthèse nécessite la coopération des deux partenaires : la plante fournit la protéine tandis que la bactérie est responsable de la synthèse de l'hème.

Le faible nombre de nodules actifs au niveau du sol contaminé serait dû à la diminution de l'infection des nodules par les bactéries. Selon Layzel et *al.* (1990) in Hopkins (2003), la fonction de la légghémoglobine est de lier l'oxygène et contrôler sa libération dans la région contenant les bactéroïdes. Or, cette protéine étant absente indiquerait l'absence d'infection puisque, d'après Hopkins (2003), elle est localisée dans les cellules hôtes infectées par les bactéroïdes.

1.7. Valorisation des plantes par une production de bioéthanol

A la fin de la culture, nous avons réalisé un éthylotest qui indique la présence de bioéthanol par l'apparition d'une couleur verte. Suite à l'utilisation de la biomasse végétale qui est de 8,4g, le volume de bioéthanol produit dans notre essai est de 27 ml.

Le rapport de la biomasse végétale par le volume de bioéthanol à permet d'obtenir une valeur énergétique de 1.6 TEP/T de biomasse.

D'après le Conseil Mondial de l'Energie le rapport fait qu'une biomasse végétale de 10^5 tonnes permet de produire 13.5 TEP/T.

La comparaison entre ces deux valeurs, montre que la quantité produite reste relativement faible.

Nous supposons que le faible rendement de la production du bioéthanol est dû au procédé biochimique utilisé dans l'expérience.

En effet, l'hydrolyse à l'acide dilué qui est à un stade de développement plus avancé que les autres processus, présente des limites de rendement de 50% à 70% du glucose. L'hydrolyse enzymatique, par contre, présente déjà des rendements élevés 75% à 85%, et de

grandes améliorations sont encore attendues (85%-95%). L'hydrolyse de la cellulose par des enzymes est souvent la voie préconisée pour l'obtention des sucres fermentescibles pour les raisons suivantes : elle est plus économique, génère peu d'effluents à traiter, présente des perspectives d'amélioration beaucoup plus grandes que l'hydrolyse chimique qui a fait l'objet de travaux depuis plusieurs dizaines d'années (CEA, 2005).

D'après les résultats d'autres travaux, le procédé thermochimique est beaucoup plus avantageux que les autres. Selon les chercheurs du CEA (2005), la transformation thermochimique qui conduit à la gazéification des substances organiques et végétales, convient particulièrement à la valorisation des produits lignocellulosiques. C'est cette filière qui présente le plus fort potentiel pour la fabrication du carburant.

Selon Ballerini (2006), que ce soit pour la voie biochimique ou pour la voie thermochimique, la nature de la biomasse mobilisée a une influence cruciale sur le rendement des procédés. Dans les procédés biochimiques, la lignine est un coproduit qui n'est pas transformée en éthanol et sa présence diminue donc le rendement de la conversion. Alors que dans les procédés thermochimiques, la lignine n'a pas d'importance puisque la totalité de la plante est gazéifiée (Depatre, 2010).

Par ailleurs, les résultats de l'ADEME (2004), confirment que le développement de la voie thermochimique dans la conversion de la biomasse lignocellulosique passe par l'augmentation, d'une part, des rendements de conversion en carbone, d'autre part, des rendements énergétiques, car c'est un processus continu permettant une production plus facile. Ce procédé peut être appliqué à des matières premières différentes.

III.1. Effet des hydrocarbures sur le végétal

1.1. Taux de levée

La levée des graines a été observée à partir du 10^{ème} jour après le semis. La comparaison de ces résultats avec les valeurs obtenues antérieurement pour ces mêmes espèces sur un sol non contaminé est présentée dans la figure 8.

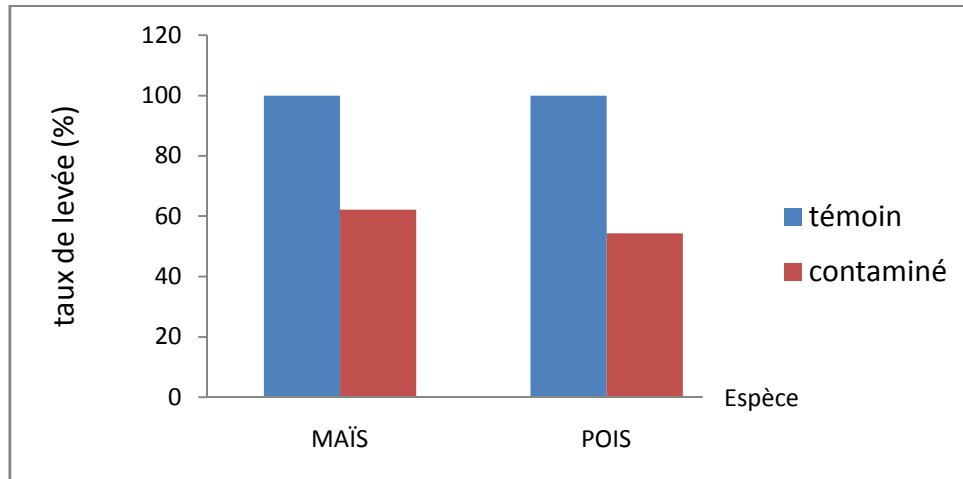


Figure 8: Taux de levée du maïs et du pois.

La levée du maïs a atteint 62,22 % dans le sol contaminé, ce qui représente un taux moyen quand on sait que cette espèce peut lever à 100 % dans un sol non contaminé.

Pour le pois, la levée enregistrée a été de 54,36 %, valeur qui est loin des 100% que cette espèce atteint habituellement dans un sol non pollué.

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il y avait des différences significatives, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont induit un taux de levée du maïs inférieur au taux atteint dans des conditions normales.

mμ	t	p-value	df	moyenne
0	-6.426	0.02337	2	62.22

Le test de Student pour un échantillon comparé à un standard a révélé qu'il y a une différence significative, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont induit un taux de levée du pois inférieur à celui du témoin.

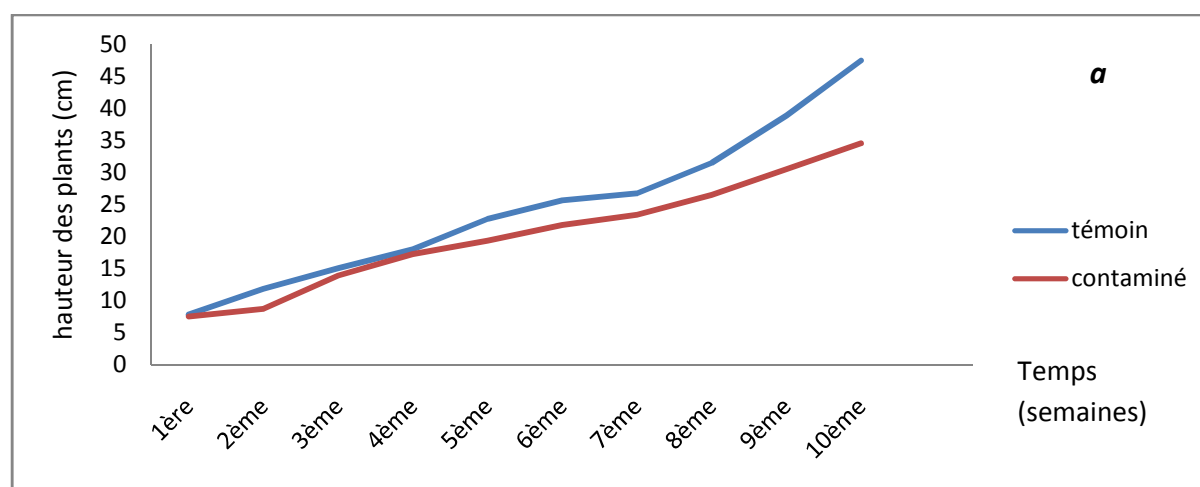
mμ	t	p-value	df	moyenne
0	-4.3394	0.04922	2	54.36

D'après les résultats de l'analyse paramétrique, nous estimons que les hydrocarbures présents dans le sol (essence et gasoil) ont eu un effet dépressif sur la germination des graines du maïs et du pois. La réduction du taux de levée dans le sol contaminé peut être due aux effets des hydrocarbures sur les propriétés du sol, qui vont se traduire par une inhibition ou une réduction de la germination des graines. Elle peut être due aussi à l'effet que ces substances peuvent exercer sur les réactions métaboliques se déroulant dans les graines. En effet, Udo et Fayemi (1975) *in* Chaineau et *al.* (1997) notent que les hydrocarbures peuvent entrer dans la graine, altérer les réactions métaboliques ou bien tuer l'embryon au contact direct.

Malgré cette diminution du taux de levée, les deux espèces ont montré une aptitude à germer dans un sol fortement pollué par les carburants. Ceci témoigne de leur aptitude à résister à cette pollution. Ce comportement n'est pas étranger à ces plantes surtout le maïs connu pour sa capacité à supporter la pollution du sol par les hydrocarbures. En effet, Chaineau et *al.* (1997) ont montré que la majorité des graminées telles que le maïs ont la capacité de tolérer la pollution par les hydrocarbures.

1.2. Hauteur des plants

La figure 11 illustre l'évolution de la hauteur des plants du maïs et du pois respectivement dans un sol contaminé en comparaison avec la croissance qu'ont ces plantes sur un sol témoin.



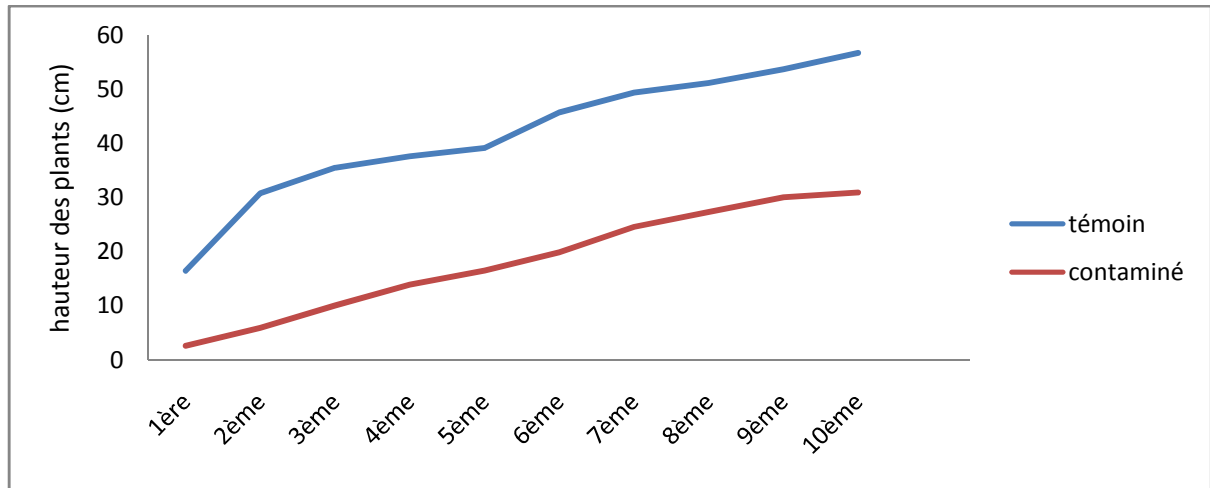


Figure 9: hauteur du maïs et du pois dans le sol contaminé et le sol témoin.

Nous avons constaté qu'au bout de la dixième semaine de culture, le maïs a atteint 30,98cm alors que, d'après les résultats de Moula et Mahlal (2011) il peut croître jusqu'à atteindre une hauteur de 56,75cm dans un sol non contaminé.

Concernant le pois, la hauteur moyenne enregistrée sur dix semaines après le semis est de 34,54cm, soit environ 13cm de moins que la hauteur atteinte par cette espèce dans le sol non pollué d'après les résultats de Oukaci et Lekadir (2014).

Le test de Student à un échantillon a révélé qu'il y avait une différence très hautement significative entre la hauteur moyenne du maïs et celle enregistrée dans les travaux antérieurs. Ceci indique que les contaminants (essence et gasoil) ont un effet négatif sur la hauteur du maïs.

mμ	t	p-value	df	moyenne
56.75	-59.92	0.00027	2	34.98

Pour ce qui est du pois, le test de Student pour un échantillon comparé à un standard a révélé qu'il y a une différence significative, ce qui indique que les contaminants ont un effet négatif peu prononcé sur la croissance du pois.

mμ	t	p-value	df	moyenne
47.54	-4.7229	0.04203	2	34.54

D'après les résultats représentés dans les figures 11, nous avons constaté que les hydrocarbures ont eu un effet inhibiteur sur la croissance des deux cultures. Ces résultats peuvent être dus à l'effet des hydrocarbures sur la disponibilité des éléments nutritifs et sur les propriétés du sol. Selon Giddens (1975), quelque soit la concentration en hydrocarbures, la croissance des plantes telle que le maïs est réduite. Cette réduction serait due à un manque d'assimilation d'eau et d'éléments nutritifs.

Chaîneau et *al.* (1997), ont associé la réduction de la croissance des plantes lors d'une contamination du sol par les hydrocarbures au déficit nutritif causé par la présence de ces polluants. D'après Chaîneau et *al.* (2000), la phytotoxicité des hydrocarbures provoque une inhibition sur une longue période du développement de la végétation.

Toutefois, l'effet observé dans notre expérience est plus marqué chez le maïs que chez le pois. Selon Duchaufour (1997), les hydrocarbures perturbent la croissance des végétaux, mais leur phytotoxicité dépend de la dose, du type de molécule et des espèces végétales.

1.3 Biomasse végétale

La figure 14 présente la biomasse végétale dans le sol contaminé en comparaison avec les valeurs obtenue habituellement sur le sol non pollué.

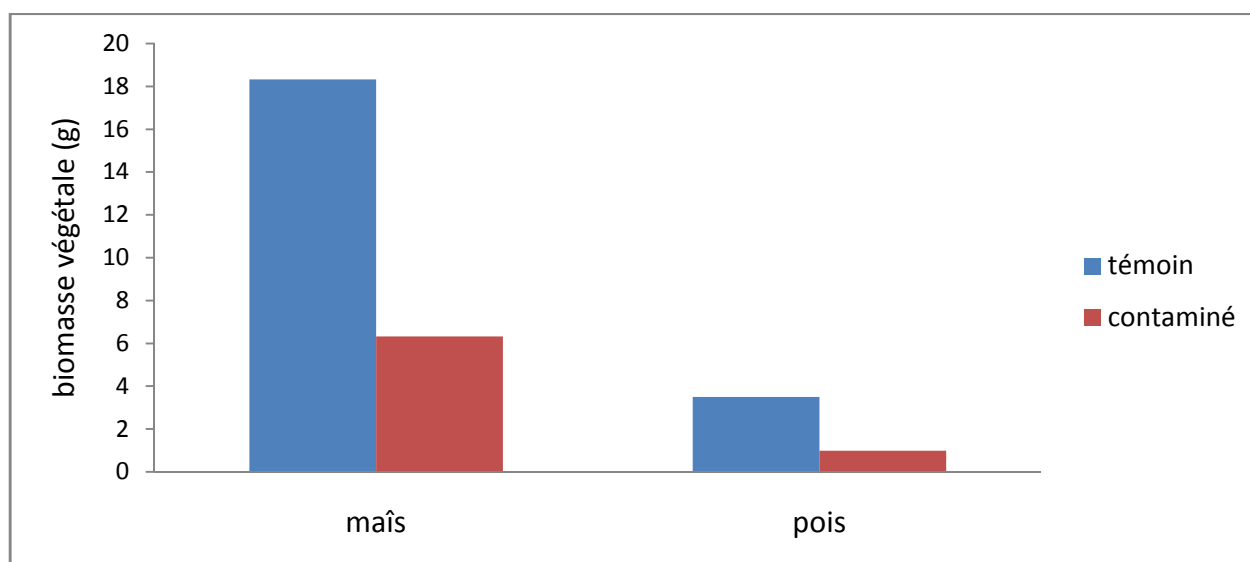


Figure 10: Biomasse végétale du maïs et du pois.

La biomasse végétale du maïs (6,33g) est trois fois plus faible que celle que cette espèce est capable d'atteindre dans un sol non contaminé.

La biomasse végétale du pois (0,96g) est quatre fois plus faible que la valeur obtenue antérieurement dans un sol sain.

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il y avait une différence significative, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont un effet négatif sur la biomasse du maïs.

m _p	t	p-value	df	moyenne
18.99	-4.6183	0.04383	2	6.33

Le test de Student à un échantillon a révélé qu'il y avait une différence hautement significative, ce qui indique que les contaminants (essence et gasoil) ont un effet négatif sur la biomasse du pois.

m _p	t	p-value	df	moyenne
3.92	-21.07	0.0022	2	0.96

D'après les résultats obtenus nous avons constaté que l'essence et le gasoil ont un effet toxique sur la biomasse végétale.

La biomasse végétale est un critère de mesure du rendement au niveau de sol contaminé par les hydrocarbures. L'effet toxique des hydrocarbures s'exprime par une diminution de la biomasse (Chaineau et *al.*, 1997). La réduction de biomasse végétale du maïs dans le sol contaminé par les hydrocarbures est peut être due à l'effet toxique que ces derniers peuvent exercer sur les caractéristiques physico-chimiques du sol.

Selon Heller (1998), la réduction de la biomasse est reliée directement au sol qui est la source d'une grande partie des éléments nécessaires au développement des végétaux.

En effet, Duchaufour (1995), a noté que l'azote jouait un rôle important dans la nutrition et le développement du végétal (la croissance et le rendement). Chaineau et *al.* (1997) ont confirmé que l'effet toxique des hydrocarbures sur la plante se traduisait par une réduction significative de la croissance.

1.4. Volume racinaire

Le volume racinaire du maïs et du pois dans un sol témoin et contaminé présenté par la figure 11.

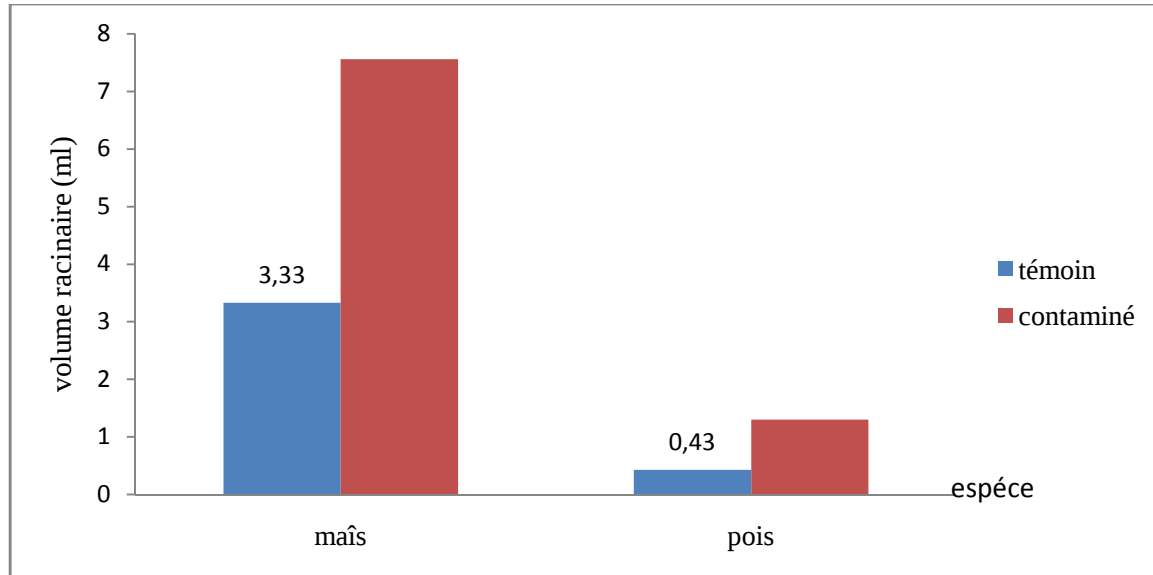


Figure 11: volume racinaire du maïs et du pois dans un sol contaminé et un sol témoin.

Le maïs présente un volume racinaire de 7,56ml; une valeur qui est supérieure à celle que cette plante peut atteindre dans un sol non pollué, ce qui explique que le système racinaire du maïs est stimulé par la présence des carburants.

Le pois présente un volume racinaire de 1,3ml qui est également supérieur à celui atteint habituellement dans un sol sain, ce qui expliquerait la résistance du pois aux hydrocarbures.

Le test de Student pour un échantillon a révélé l'absence de différences significatives entre le volume racinaire moyen du maïs et la valeur de référence qu'il atteint dans le sol non contaminé.

mμ	t	p-value	df	moyenne
3.33	4.15	0.053	2	7.56

Le test de Student à un échantillon a révélé une différence non significative. Ce qui indique qu'il n'y a pas de différence entre le volume racinaire du pois obtenue dans notre essai et celui rapporté dans la bibliographie dans le cas d'un sol non pollué.

μ	t	p-value	df	moyenne
0.43	1.42	0.29	2	1.3

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la présence des hydrocarbures dans le sol ne porte pas atteinte au développement racinaire. Ce qui permet au système racinaire d'avoir un meilleur développement avec de nombreuses ramifications dans un sol contaminé. Ceci peut être corrélé avec une bonne structure du sol.

D'après Mettaur et *al.* cités par Fezzani et Khider (2008), les hydrocarbures peuvent améliorer la stabilité structurale du sol.

1.5. Nombre de nodules

Le nombre de nodules sur les racines du pois et leur activité en comparaison avec les valeurs références obtenues dans les sols sains est présenté par la figure 20.

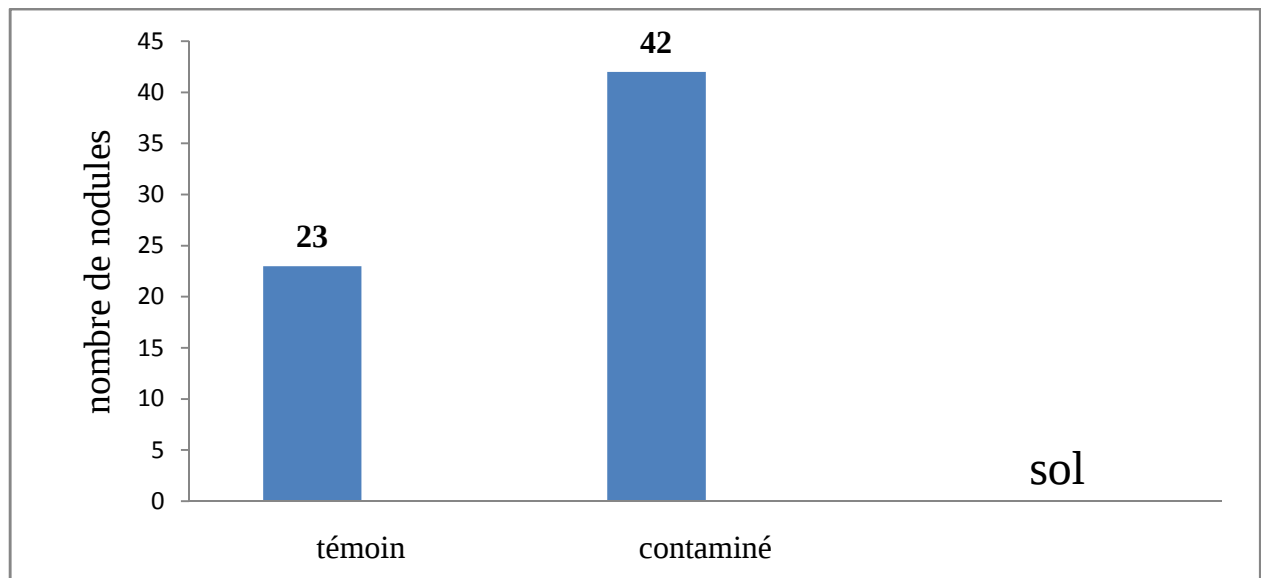


Figure 12 : le nombre de nodules actif et non actif du pois.

Le nombre de nodules enregistré est de 42 dans un sol contaminé représente quasiment le double du nombre de nodules que présente cette espèce dans un sol non pollué.

μ	t	p-value	df	moyenne
42	-17.55	0.83	2	6.16

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il n'y avait pas de différence significative entre le nombre de nodules enregistré sur les racines du pois et le nombre qui est obtenu dans un sol sain.

D'après ces résultats, nous constatons que l'effet des hydrocarbures est non significatif sur le nombre de nodules.

Nos résultats concordent avec ceux obtenus par Chaib (2014) qui a observé que le pétrole brut à 5% n'avait pas d'effet sur le processus de nodulation.

1.6. Nombre de nodules actifs

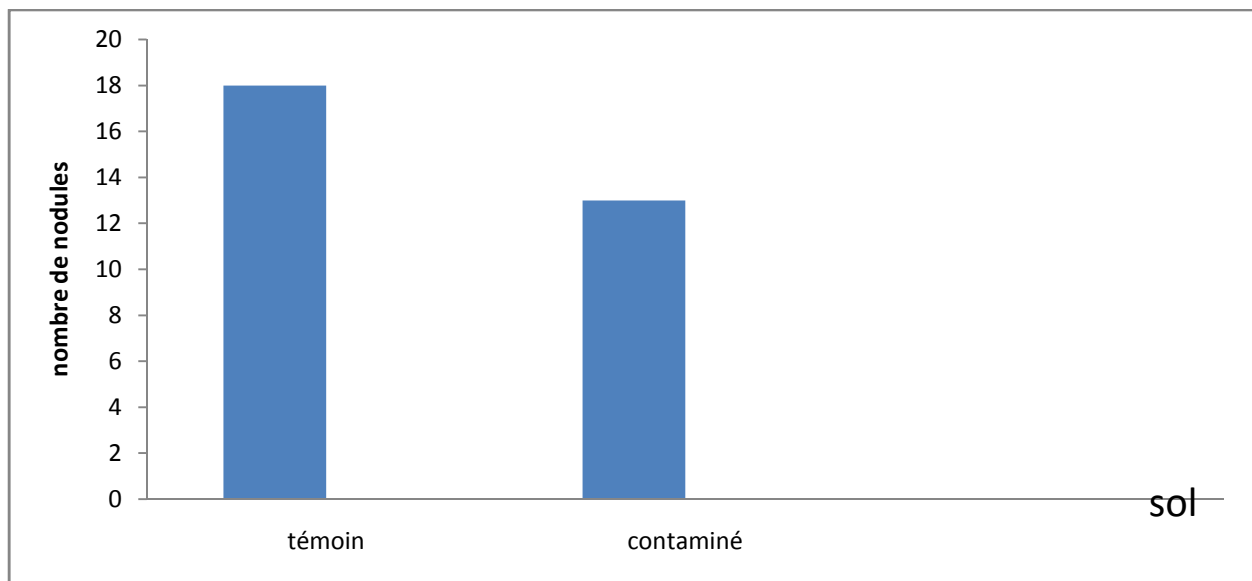


Figure 13 : Nombre de nodules actif dans un sol témoin et contaminé.

Nous avons enregistré 13 nodules actifs dans un sol contaminé alors que dans les études précédentes le nombre de nodules enregistrés dans le sol sain est de 18.

μ	t	p-value	df	moyenne
18	-15	0.042	1	12.5

Le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il y a une différence significative, entre le nombre de nodules actifs présents sur les racines du pois dans le sol contaminé et la valeur référence enregistrée dans le sol non contaminé figure 23.

Nous pouvons suggérer que la faible fixation d'azote est reliée soit à la détérioration des nodules au bien au manque d'oxygène ou encore à l'absence de légghémoglobine, à cause de l'effet des hydrocarbures car l'apparition de la couleur rougeâtre dépend de l'oxygène et de la chromoprotéine. Heller (1998) a noté que la fixation exigeait la présence de la légghémoglobine dont la synthèse nécessite la coopération des deux partenaires : la plante fournit la protéine tandis que la bactérie est responsable de la synthèse de l'hème.

Le faible nombre de nodules actifs au niveau du sol contaminé serait dû à la diminution de l'infection des nodules par les bactéries. Selon Layzel et *al.* (1990) in Hopkins (2003), la fonction de la légghémoglobine est de lier l'oxygène et contrôler sa libération dans la région contenant les bactéroïdes. Or, cette protéine étant absente indiquerait l'absence d'infection puisque, d'après Hopkins (2003), elle est localisée dans les cellules hôtes infectées par les bactéroïdes.

1.7. Valorisation des plantes par une production de bioéthanol

A la fin de la culture, nous avons réalisé un éthylo-test qui indique la présence de bioéthanol par l'apparition d'une couleur verte. Suite à l'utilisation de la biomasse végétale qui est de 8,4g, le volume de bioéthanol produit dans notre essai est de 27 ml.

Le rapport de la biomasse végétale par le volume de bioéthanol permet d'obtenir une valeur énergétique de 1.6 TEP/T de biomasse.

D'après le Conseil Mondial de l'Energie le rapport fait qu'une biomasse végétale de 10^5 tonnes permet de produire 13.5 TEP/T.

La comparaison entre ces deux valeurs, montre que la quantité produite reste relativement faible.

Nous supposons que le faible rendement de la production du bioéthanol est dû au procédé biochimique utilisé dans l'expérience.

En effet, l'hydrolyse à l'acide dilué qui est à un stade de développement plus avancé que les autres processus, présente des limites de rendement de 50% à 70% du glucose. L'hydrolyse enzymatique, par contre, présente déjà des rendements élevés 75% à 85%, et de

grandes améliorations sont encore attendues (85%-95%). L'hydrolyse de la cellulose par des enzymes est souvent la voie préconisée pour l'obtention des sucres fermentescibles pour les raisons suivantes : elle est plus économique, génère peu d'effluents à traiter, présente des perspectives d'amélioration beaucoup plus grandes que l'hydrolyse chimique qui a fait l'objet de travaux depuis plusieurs dizaines d'années (CEA, 2005).

D'après les résultats d'autres travaux, le procédé thermochimique est beaucoup plus avantageux que les autres. Selon les chercheurs du CEA (2005), la transformation thermochimique qui conduit à la gazéification des substances organiques et végétales, convient particulièrement à la valorisation des produits lignocellulosiques. C'est cette filière qui présente le plus fort potentiel pour la fabrication du carburant.

Selon Ballerini (2006), que ce soit pour la voie biochimique ou pour la voie thermochimique, la nature de la biomasse mobilisée a une influence cruciale sur le rendement des procédés. Dans les procédés biochimiques, la lignine est un coproduit qui n'est pas transformée en éthanol et sa présence diminue donc le rendement de la conversion. Alors que dans les procédés thermochimiques, la lignine n'a pas d'importance puisque la totalité de la plante est gazéifiée (Depatre, 2010).

Par ailleurs, les résultats de l'ADEME (2004), confirment que le développement de la voie thermochimique dans la conversion de la biomasse lignocellulosique passe par l'augmentation, d'une part, des rendements de conversion en carbone, d'autre part, des rendements énergétiques, car c'est un processus continu permettant une production plus facile. Ce procédé peut être appliqué à des matières premières différentes.

I. Pollution du sol par les hydrocarbures :

La pollution du sol est considérée comme une accumulation de plusieurs effets provoqués par les polluants anthropiques sur diverses transformations soit chimiques, physiques ou biologiques se déroulant dans le sol. Cette pollution représente une nouvelle menace apparue progressivement depuis l'essor de l'industrie (Koller, 2004).

Suite au développement intense du secteur industriel, l'utilisation générale des hydrocarbures a augmenté en raison de leur importance comme combustibles fossiles ou carburants, par les particuliers et les entreprises artisanales ou commerciales très dispersées, cela a entraîné une présence de ce type de polluants qu'ils soient d'origine industrielle ou urbaine et qui menacent notre environnement (Colin, 2000).

I.1 Définition des hydrocarbures

Ce sont des composés organiques ne contenant que du carbone et de l'hydrogène (Bocard, 2006). Ils peuvent aussi contenir d'autres éléments minoritaires qui sont des atomes de soufre, d'azote et d'oxygène (Fattal, 2008).

Les hydrocarbures présentent une importance commerciale : nous les utilisons comme carburants, combustibles, huiles (Anonyme, 2010).

I.2 Classification des hydrocarbures

Il existe différentes classes d'hydrocarbures :

- ✓ **Les alcanes (paraffines) :** sont des hydrocarbures légers, aliphatiques, saturés, à chaîne droite (n-alcanes) ou ramifiées (iso-alcanes). Dans le cas d'une pollution, ces hydrocarbures ont une biodégradabilité rapide, surtout lorsque la chaîne est droite (Fattal, 2008).
- ✓ **Les cyclo-alcanes :** sont des hydrocarbures cycliques constitués de six atomes de carbone qui forment une chaîne fermée. Ils sont généralement peu toxiques et subsistent plus longtemps que les alcanes dans le milieu (Fattal, 2008).

- ✓ **Les aromatiques** : comprennent des composés qui sont insaturés, polycycliques dont la molécule contient un cycle benzénique. La pollution par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) a un impact sur la faune et la flore du fait de leur toxicité et leur persistance (Fattal, 2008).
- ✓ **Les asphaltènes et résines** : sont des composés stables de très haut poids moléculaire. En plus du carbone et de l'hydrogène, ils contiennent des hétéroatomes d'azote, de soufre ou d'oxygène. Ils se caractérisent par un point d'ébullition élevé (Fattal, 2008).

I.3 Les principales sources de contamination du sol par les hydrocarbures

Selon Battaz (2009), la pollution du sol par les hydrocarbures est une grave problématique qui présente des caractéristiques spécifiques dont la société humaine ne se préoccupe pas réellement et qui génère un impact négatif sur la qualité du sol. L'origine des pollutions, localisées ou diffuses, est liée aux différentes activités urbaines, industrielles, commerciales et autres, passées ou contemporaines.

I.3.1 Le transport des hydrocarbures peut conduire à l'introduction de grandes quantités de ces composés dans le sol, sous forme de brut pétrolier ou de produits raffinés: carburants et huiles. D'après Battaz (2009), cela est principalement dû aux :

- déversements plus ou moins massifs lors d'accidents de transport d'hydrocarbures par route ou chemin de fer ;
- ruptures accidentelles d'oléoducs ;
- fausses manœuvres humaines lors des opérations de transfert et de distribution (Battaz, 2009).

I.3.2 Les rejets telluriques proviennent de différentes sources selon Bocard (2006) :

- incendies ou explosions d'unités de production industrielle ou de cuves de stockage hors sol dans les centres de distribution ;
- fuites des cuves enterrées, industrielles (stations-service par exemple) ou domestiques, résultant souvent de la corrosion des installations ;
- infiltrations à partir de dépôts de déchets industriels et urbains contenant des hydrocarbures, mal stockés et mal contrôlés (exemple : l'enfouissement des résidus de distillation de la houille, pratiquée pendant des décennies pour produire le gaz de ville);

- déversements et enfouissements volontaires de déchets d'hydrocarbures liés à des activités domestiques, artisanales, commerciales, agricoles ou industrielles

I.3.3 Les retombées atmosphériques dans des zone industrielles ou urbaines ou leurs périphéries (hydrocarbures volatils, imbrulés de combustion).

I.4 Devenir des hydrocarbures dans le sol

Les composés organiques tels que les hydrocarbures sont susceptibles de polluer les sols, et leur nombre est en augmentation. Ces derniers ont des propriétés physico-chimiques et toxicologiques qui déterminent leur comportement dans l'environnement, et des impacts très variables (Koller, 2004).

- **Mobilité** par transfert actif ou passif et mobilisation, l'hydrocarbure rejeté dans le sol peut s'immiscer dans tous les compartiments de l'environnement soit l'air, l'eau ou bien le sol. Ce processus va permettre la mobilisation d'une partie de la masse des hydrocarbures par volatilisation, lixiviation, transfert dans la biomasse ou par un simple déplacement gravitaire (Colin, 2000).
- **Transformation abiotique** des hydrocarbures qui peuvent être dégradés par photo-oxydation et subir des réactions d'oxydation. La photo-oxydation ne peut avoir lieu que pour les composés organiques qui se situent à moins de 1mm de la surface du sol. Ce processus permet une nette diminution des HAP dans le sol (Laurent et *al.* , 2005).
- **Biodégradation** des hydrocarbures est particulièrement difficile notamment pour les HAP, en raison de leur faible disponibilité, et leur pouvoir d'adsorption. Ainsi, la sorption a une influence prépondérante sur le devenir de ces polluants, en particulier sur leur mobilité et leur relargage dans la phase aqueuse qui empêchent leur dégradation. La biodégradation s'effectue en conditions aérobies ou anaérobies par les bactéries. Toutefois, certains champignons présentent une bonne aptitude à transformer les HAP (Battaz, 2006).
- **Sorption** des HAP qui, étant hydrophobes, présentent une forte affinité pour la matière organique contenue dans la matrice solide (la sorption peut également avoir lieu en phase aqueuse).

De manière générale, la sorption des polluants sur la phase solide a pour effet d'entraîner un retard dans le transport des polluants dissous dans le milieu aquifère (Anonyme, 2005).

I.5 Effets des hydrocarbures sur les êtres vivants et l'environnement

La pollution peut atteindre directement l'homme, dans sa santé ou son environnement proche. Il peut aussi toucher indirectement à travers la chaîne alimentaire ou l'environnement plus lointain (Ngo et *al.*, 2004).

I.5.1 Effets sur le végétal

Le sol est le support et le réservoir nutritif du végétal. La présence des hydrocarbures constitue une grave menace. L'effet de ces derniers est très divers et varié (Colin, 2000). La phytotoxicité des hydrocarbures, inhibe le développement de certains végétaux qui se manifeste à travers l'inhibition de la germination des graines et/ou la croissance végétative qui a un impact sur le rendement final (Koller, 2004).

I.5.2 Effets sur la santé humaine

L'effet des hydrocarbures dépend de la durée d'exposition plus particulièrement les HAP qui provoquent à long terme des troubles neurologiques et neurophysiologiques, de fait de leur pouvoir cancérogène, mutagène, tératogène. Par contre un contact cutané induit des érythèmes (Fattal, 2008).

L'effet dépendra aussi du temps d'inhalation, et de la possible consommation de produits contaminés. D'autres manifestations sont observées lors du nettoyage des milieux de déversement, notamment des douleurs aux jambes et des douleurs abdominales ainsi des troubles de sommeil (Fattal, 2008).

La toxicité des HAP est plus importante que celle des aliphatiques. Cependant les alcanes à faible poids moléculaire présentent un danger pour la santé. Par exemple, l'hexane lors d'une exposition prolongée, provoque une atteinte des nerfs périphériques conduisant à une paralysie de membranes inférieures (Battaz, 2009).

I.5.3 Effets sur l'environnement

A travers l'étude de l'évolution des hydrocarbures dans les phases liquide et gazeuse du sol, on peut dire que les terrains contaminés entraînent une extension de la contamination, que ce soit par voie aérienne (entraînement des poussières contaminées et

migration des vapeurs) ou souterraine (migration d'eaux contaminées), aux environs immédiats du site où peuvent habiter des populations humaines (Fattal, 2008).

I.6. Procédés de réhabilitation des sols contaminés

Ils consistent à épurer ou isoler un milieu qui a été exposé à une pollution dans le but de le traiter et le rendre utilisable pour des activités agricoles et domestiques (Koller, 2004).

I.6.1 Procédés thermiques

Consistent à porter le matériel pollué à haute température pour le détruire, l'extraire ou l'immobiliser (Lecomte, 1998). Ces procédés sont souvent dispendieux mais efficaces tant pour l'extraction que pour l'élimination. Les principales méthodes sont : l'incinération, la désorption thermique, la réduction thermique et l'inertage-stabilisation (Koller, 2004).

I.6.2 Procédés physiques

Ce sont des méthodes qui consistent à utiliser des fluides présents dans le sol ou injectés comme vecteur afin de transférer la pollution vers des points d'extraction (Colin, 2000). Les techniques les plus utilisées sont le lavage, le pompage-écrémage et le venting (Colin, 2000 ; Koller, 2004).

I.6.3 Procédés chimiques

Ils font appel à un principe réactionnel dans le but de transformer ou d'éliminer les polluants à l'aide des réactifs (Lecomte, 1998).

D'après Koller (2004), les technologies physico-chimiques utilisées sont souvent très coûteuses et provoquent d'importantes modifications des propriétés du milieu, ce qui incite à développer des méthodes biologiques car l'intérêt de ces dernières réside essentiellement dans la facilité de leur mise en œuvre ainsi que leur coût (Cardiere, 2006).

I.6.4 Procédés biologiques

Ce sont des techniques qui exploitent les propriétés d'un organisme vivant afin de réaliser l'opération de la dépollution. Il peut s'agir d'un microorganisme (bactérie, champignon) ou bien d'un végétal herbacé qui a le pouvoir d'agir sur le polluant par absorption, accumulation ou dégradation pour le rendre moins toxique (Cardière, 2006).

I.6.4.1 Bioremédiation : c'est l'utilisation des microorganismes généralement des bactéries endogènes ou exogènes sur le terrain contaminé afin de réduire la pollution (Cardière, 2006).

I.6.4.2 Phytoremédiation : elle regroupe toutes les techniques qui utilisent les végétaux comme épurateur du milieu. Le principe est de planter des végétaux supérieurs spécifiques afin de traiter la zone polluée ; ces végétaux vont transformer, dégrader ou stabiliser les polluants dans le sol (Lecomte, 1998). Il existe plusieurs mécanismes de phytoremédiation (tableau 1).

Tableau 1 : présentation des différentes phytotechnologies (Lecomte, 1998 ; Bert, 2007).

Techniques	Principe
Phytoextraction	Elle vise l'extraction et l'accumulation des contaminants présents dans les racines et les parties aériennes. <i>Thlaspi</i> et <i>Brassica</i> sont les plantes les plus utilisées.
Phytostabilisation	Consiste à piéger les polluants dans un réseau racinaire afin d'être accumulés et ainsi immobilisés. Généralement on utilise les plantes à racines fibreuses et profondes
Phytotransformation	Il s'agit de dégrader les polluants organiques complexes en composés plus simple pour qu'ils soient intégrés dans le tissu racinaire. Les arbres de la famille du saule, du peuplier ainsi que les herbes et les légumineuses sont les plus répandus.
Phytostimulation	C'est de stimuler la dégradation microbienne et fongique par les enzymes libérées dans la rhizosphère racinaire ce qui entraîne la destruction des polluants. Le plus souvent, on utilise <i>Brassica juncea</i> (moutarde) ainsi que les plantes marécageuses.

SCHNOOR et *al.* (2003) ont noté que les plantes peuvent absorber le contaminant pour le métaboliser ou le stocker, ce qui explique le risque de son transfert dans d'autres compartiments de l'environnement, d'où la nécessité de valoriser ces plantes.

Pour ce faire, la biomasse végétale produite lors de la phytoremédiation pourrait être utilisée dans la production de biocarburants.

II. Généralités sur les biocarburants

Les biocarburants représentent une source d'énergie renouvelable appelée énergie verte.

II.1 Définition des biocarburants

Ce sont des carburants renouvelables issus de la transformation des matières organiques non fossiles provenant de la biomasse. On distingue différents types de biocarburants qui peuvent être de 1^{ère}, de 2^{ème} ou de 3^{ème} génération ; cette distinction se fait par rapport à la matière première utilisée (Debiton, 2010).

II.2 Type de biocarburants

II.2.1 Biocarburants de 1^{ère} génération

Selon le mode de production, cette filière regroupe deux grands types de produits (figure1). La filière biodiesel et celle des alcools dont le plus connu est l'éthanol (Casimir, 2010).

Le biodiesel appelé aussi le biogazole est fabriqué par une transestérification d'huiles végétales issues des organes de réserve des cultures comme les graines de céréales ou des oléagineuses (colza et tournesol). Il est doté d'une capacité beaucoup plus importante que l'éthanol (Anonyme, 2007).

L'éthanol est obtenu à partir des plantes sucrières (betterave, canne à sucre) et de l'amidon des céréales (blé, maïs, orge) (Togbe, 2010).

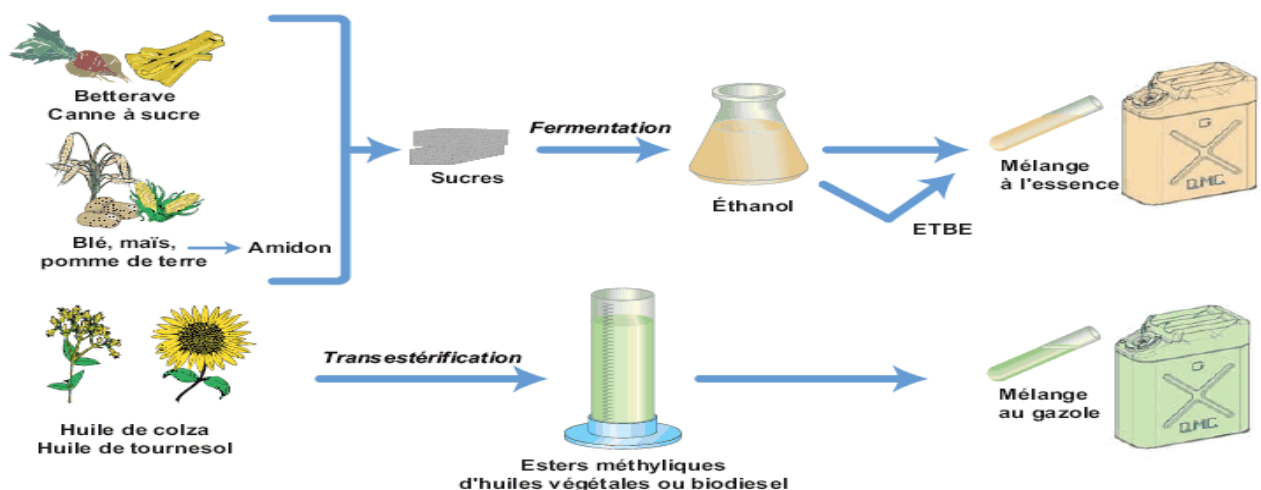


Figure1: filières de biocarburants de première génération (Berthier et al., 2013).

II.2.2 Biocarburants de 2^{ème} génération

La filière biocarburants dits de deuxième génération utilise une biomasse lignocellulosique comme matière première. Cette dernière présente l'avantage d'être non alimentaire, abondante et renouvelable (Anonyme, 2007).

La fabrication de ces biocarburants comporte une phase de gazéification de la biomasse et une synthèse de carburants à partir de ce gaz. La production de l'éthanol implique la conversion de cellulose en glucose (Anonyme, 2007).

II.2.3 Biocarburants de 3^{ème} génération

Ils sont obtenus à partir de l'utilisation de microorganismes tels que les micro-algues. Celles-ci peuvent accumuler des acides gras qui permettent de donner un meilleur rendement. A partir de ces acides gras on obtient un biodiesel (CDE, 2012).

Enfin, certaines de ses micro-algues contiennent des sucres qui peuvent être fermentés en bioéthanol (CDE, 2012).

II.3 Procédés de fabrication

II.3.1 Procèdes de fabrication des biocarburants 1^{er} générations

Les biocarburants de première génération reposent sur l'utilisation des organes de réserves de culture qui stockent le sucre et l'amidon ou l'huile (Tongong Mbendou, 2013).

II.3.1.1 Biodiesel

L'esther méthylique de l'huile végétale (EMHV) est obtenu par une transestérification d'huile issue des plantes avec du méthanol. Ce procédé consiste à éliminer l'eau et les polluants par une filtration, puis mélanger le produit avec du méthanol et un catalyseur (hydroxyde de sodium ou de potassium). Dans les huiles, les triglycérides se recombinent en ester et en glycérol qui sont ensuite séparés et purifiés (Debiton, 2010).

II.3.1.2 Ethanol

Sa production passe par une fermentation d'un substrat riche en sucre par des levures. Il est produit à partir de plantes sucrières ; son processus de fabrication comporte une transformation des matières celluloseuses (Debiton, 2010).

La fabrication de ce dernier à partir de plantes amylacées nécessite un broyage de la graine pour faciliter la liquéfaction de l'amidon. Cette technique est réalisée sous condition de haute températures et forte pression pour faire éclater la graine. Une saccharification est nécessaire pour la transformation de l'amidon en sucre simple fermentescible. A l'aide des levures une fermentation est réalisée dans des conditions anaérobiques, à une température de 35°C et une concentration de 8-12% tout en suivant la quantité de glucose (Debiton, 2010).

Enfin une distillation et déshydratation sont réalisées pour la séparation de l'éthanol des autres liqueurs afin d'obtenir un alcool pur (Bordeur et *al.*, 2007). Cela est résumé dans la figure 2.

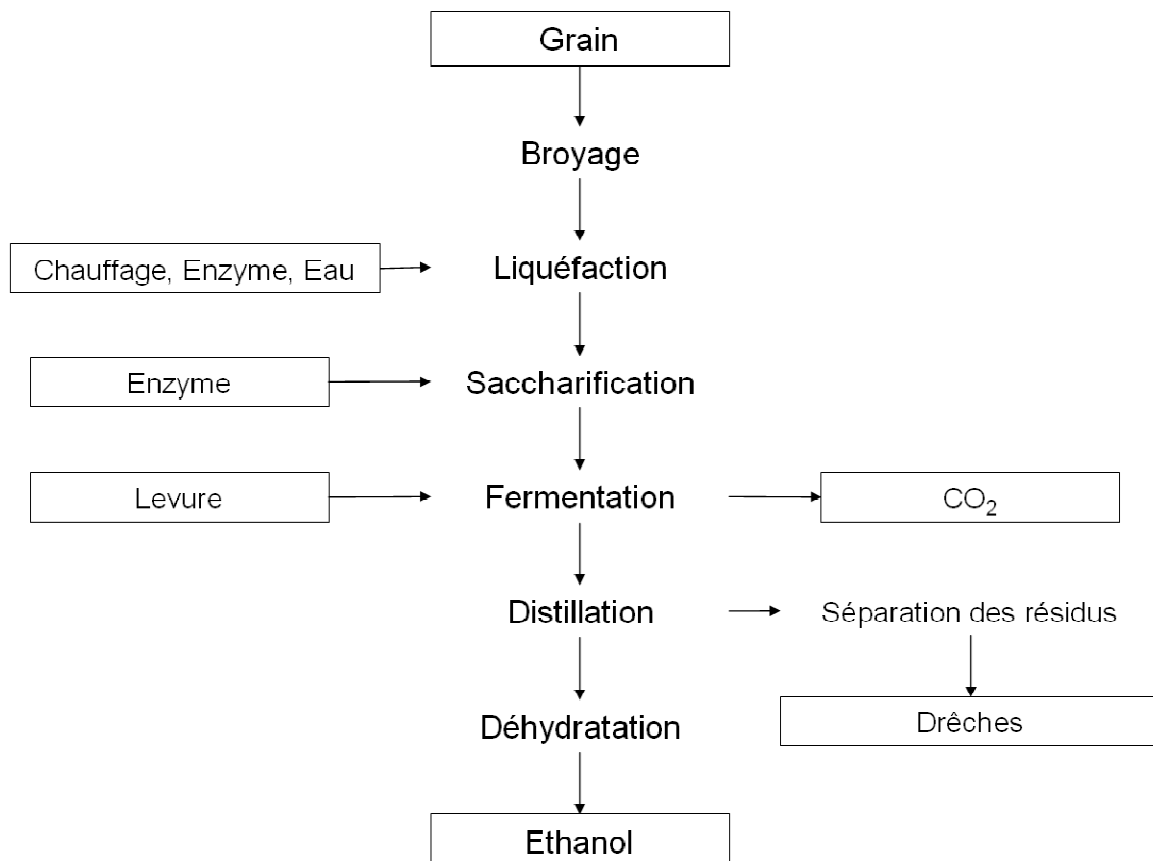


Figure 2 : Principales étapes de production du bioéthanol (Debiton, 2010).

II.2.2 Procédés de fabrication des biocarburants de 2^{ème} génération

L'intérêt principal des biocarburants de 2^{ème} génération est d'exploiter la totalité de la plante et résidus agricoles et forestiers (Derbali, 2007). Il existe deux voies de productions (figure 3).

II.2.2.1 La voie biochimique c'est la transformation des composants de la biomasse à savoir la cellulose et l'hémicellulose en éthanol (Togbe, 2010).

- **Prétraitement** : c'est un traitement qui permet de modifier les propriétés physiques et physicochimiques de la lignocellulose afin de la rendre accessible à l'hydrolyse (Derbali, 2007).
- **Hydrolyse** : c'est une étape qui permet d'hydrolyser la cellulose en monomères fermentescibles (glucose). Elle est réalisée soit par une hydrolyse chimique catalysée par un acide ou bien par une hydrolyse enzymatique pour transformer les chaînes cellulosiques en sucres fermentescibles (glucose, cellubiose) (Derbali, 2007).
- **Fermentation alcoolique** : c'est l'utilisation des levures généralement la levure *Sccharomyces cerevisiae* pour la fermentation du glucose en éthanol (Gramont, 2006).

II.2.2.2 La voie thermochimique: il s'agit de transformer la biomasse soit en huile par pyrolyse ou bien en un mélange riche en CO et H₂ (gaz de synthèse) par gazéification ; ce mélange sera ensuite transformé en carburant liquide (Togbe, 2010).

- **Pyrolyse** : c'est la conversion thermique des matières carbonées en absence de gaz de réaction pour obtenir trois phases valorisables sous forme solide (charbon), composé organique (huile de pyrolyse) et des produits gazeux (Cormeau et *al.* , 2008).
- **gazéification** : consiste à transformer la biomasse par l'action de la chaleur et en présence des réactifs oxydants (O₂, vapeur d'eau) (Cormeau et *al.* , 2008).

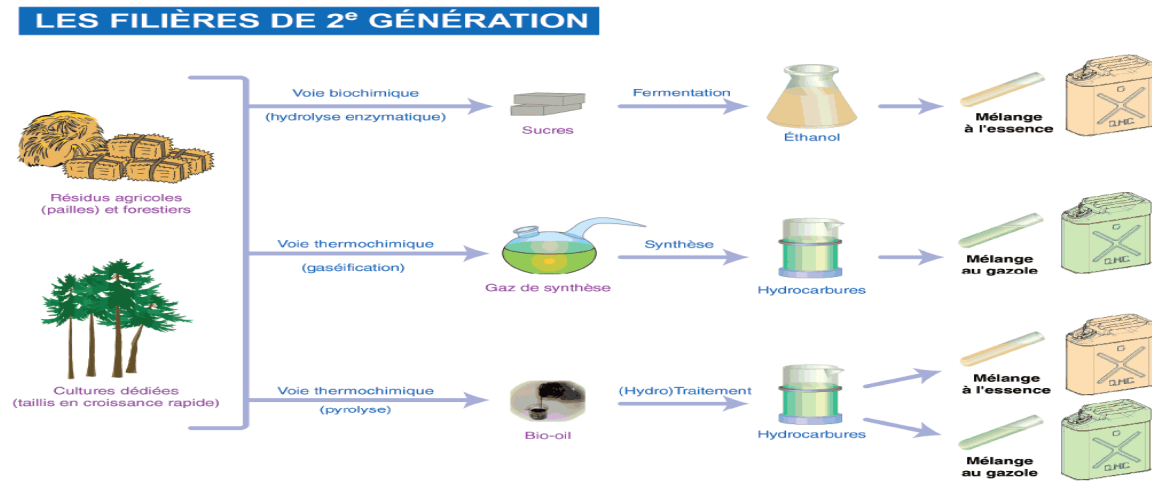
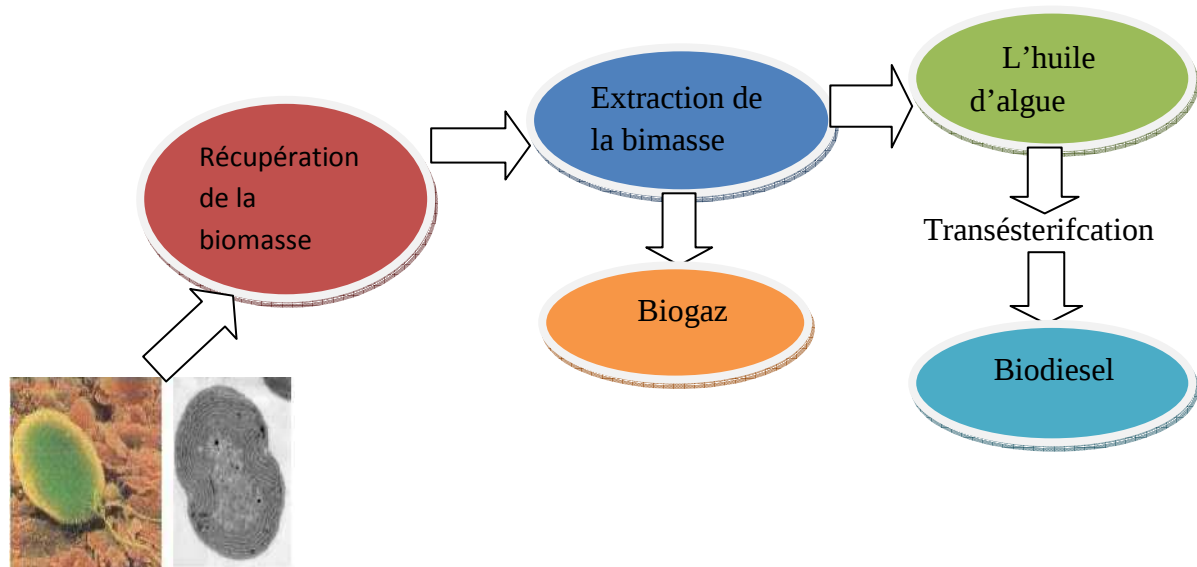


Figure 3: Voies de production des biocarburants de 2^{ème} génération (Berthier et al., 2013).

II.3. Procédés de fabrication des biocarburants 3^{ème} génération

La production de ces biocarburants consiste en une transestérification pour le biodiesel ou en une fermentation en bioéthanol pour les micro- algues qui contiennent des sucres (figure 4). Les micro- algues peuvent aussi être méthanisées pour produire de biogaz.

Les biocarburants de troisième génération ne sont encore qu'au stade de la recherche et de projets pilotes (Derbali, 2007)



Botryococcus braunii

Figure 4 : Schéma de production des biocarburants de 3^{ème} génération (Derbali, 2007).

I. Pollution du sol par les hydrocarbures :

La pollution du sol est considérée comme une accumulation de plusieurs effets provoqués par les polluants anthropiques sur diverses transformations soit chimiques, physiques ou biologiques se déroulant dans le sol. Cette pollution représente une nouvelle menace apparue progressivement depuis l'essor de l'industrie (Koller, 2004).

Suite au développement intense du secteur industriel, l'utilisation générale des hydrocarbures a augmenté en raison de leur importance comme combustibles fossiles ou carburants, par les particuliers et les entreprises artisanales ou commerciales très dispersées, cela a entraîné une présence de ce type de polluants qu'ils soient d'origine industrielle ou urbaine et qui menacent notre environnement (Colin, 2000).

I.1 Définition des hydrocarbures

Ce sont des composés organiques ne contenant que du carbone et de l'hydrogène (Bocard, 2006). Ils peuvent aussi contenir d'autres éléments minoritaires qui sont des atomes de soufre, d'azote et d'oxygène (Fattal, 2008).

Les hydrocarbures présentent une importance commerciale : nous les utilisons comme carburants, combustibles, huiles (Anonyme, 2010).

I.2 Classification des hydrocarbures

Il existe différentes classes d'hydrocarbures :

- ✓ **Les alcanes (paraffines) :** sont des hydrocarbures légers, aliphatiques, saturés, à chaîne droite (n-alcanes) ou ramifiées (iso-alcanes). Dans le cas d'une pollution, ces hydrocarbures ont une biodégradabilité rapide, surtout lorsque la chaîne est droite (Fattal, 2008).
- ✓ **Les cyclo-alcanes :** sont des hydrocarbures cycliques constitués de six atomes de carbone qui forment une chaîne fermée. Ils sont généralement peu toxiques et subsistent plus longtemps que les alcanes dans le milieu (Fattal, 2008).

- ✓ **Les aromatiques** : comprennent des composés qui sont insaturés, polycycliques dont la molécule contient un cycle benzénique. La pollution par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) a un impact sur la faune et la flore du fait de leur toxicité et leur persistance (Fattal, 2008).
- ✓ **Les asphaltènes et résines** : sont des composés stables de très haut poids moléculaire. En plus du carbone et de l'hydrogène, ils contiennent des hétéroatomes d'azote, de soufre ou d'oxygène. Ils se caractérisent par un point d'ébullition élevé (Fattal, 2008).

I.3 Les principales sources de contamination du sol par les hydrocarbures

Selon Battaz (2009), la pollution du sol par les hydrocarbures est une grave problématique qui présente des caractéristiques spécifiques dont la société humaine ne se préoccupe pas réellement et qui génère un impact négatif sur la qualité du sol. L'origine des pollutions, localisées ou diffuses, est liée aux différentes activités urbaines, industrielles, commerciales et autres, passées ou contemporaines.

I.3.1 Le transport des hydrocarbures peut conduire à l'introduction de grandes quantités de ces composés dans le sol, sous forme de brut pétrolier ou de produits raffinés: carburants et huiles. D'après Battaz (2009), cela est principalement dû aux :

- déversements plus ou moins massifs lors d'accidents de transport d'hydrocarbures par route ou chemin de fer ;
- ruptures accidentelles d'oléoducs ;
- fausses manœuvres humaines lors des opérations de transfert et de distribution (Battaz, 2009).

I.3.2 Les rejets telluriques proviennent de différentes sources selon Bocard (2006) :

- incendies ou explosions d'unités de production industrielle ou de cuves de stockage hors sol dans les centres de distribution ;
- fuites des cuves enterrées, industrielles (stations-service par exemple) ou domestiques, résultant souvent de la corrosion des installations ;
- infiltrations à partir de dépôts de déchets industriels et urbains contenant des hydrocarbures, mal stockés et mal contrôlés (exemple : l'enfouissement des résidus de distillation de la houille, pratiquée pendant des décennies pour produire le gaz de ville);

- déversements et enfouissements volontaires de déchets d'hydrocarbures liés à des activités domestiques, artisanales, commerciales, agricoles ou industrielles

I.3.3 Les retombées atmosphériques dans des zone industrielles ou urbaines ou leurs périphéries (hydrocarbures volatils, imbrulés de combustion).

I.4 Devenir des hydrocarbures dans le sol

Les composés organiques tels que les hydrocarbures sont susceptibles de polluer les sols, et leur nombre est en augmentation. Ces derniers ont des propriétés physico-chimiques et toxicologiques qui déterminent leur comportement dans l'environnement, et des impacts très variables (Koller, 2004).

- **Mobilité** par transfert actif ou passif et mobilisation, l'hydrocarbure rejeté dans le sol peut s'immiscer dans tous les compartiments de l'environnement soit l'air, l'eau ou bien le sol. Ce processus va permettre la mobilisation d'une partie de la masse des hydrocarbures par volatilisation, lixiviation, transfert dans la biomasse ou par un simple déplacement gravitaire (Colin, 2000).
- **Transformation abiotique** des hydrocarbures qui peuvent être dégradés par photo-oxydation et subir des réactions d'oxydation. La photo-oxydation ne peut avoir lieu que pour les composés organiques qui se situent à moins de 1mm de la surface du sol. Ce processus permet une nette diminution des HAP dans le sol (Laurent et *al.* , 2005).
- **Biodégradation** des hydrocarbures est particulièrement difficile notamment pour les HAP, en raison de leur faible disponibilité, et leur pouvoir d'adsorption. Ainsi, la sorption a une influence prépondérante sur le devenir de ces polluants, en particulier sur leur mobilité et leur relargage dans la phase aqueuse qui empêchent leur dégradation. La biodégradation s'effectue en conditions aérobies ou anaérobies par les bactéries. Toutefois, certains champignons présentent une bonne aptitude à transformer les HAP (Battaz, 2006).
- **Sorption** des HAP qui, étant hydrophobes, présentent une forte affinité pour la matière organique contenue dans la matrice solide (la sorption peut également avoir lieu en phase aqueuse).

De manière générale, la sorption des polluants sur la phase solide a pour effet d'entraîner un retard dans le transport des polluants dissous dans le milieu aquifère (Anonyme, 2005).

I.5 Effets des hydrocarbures sur les êtres vivants et l'environnement

La pollution peut atteindre directement l'homme, dans sa santé ou son environnement proche. Il peut aussi toucher indirectement à travers la chaîne alimentaire ou l'environnement plus lointain (Ngo et *al.*, 2004).

I.5.1 Effets sur le végétal

Le sol est le support et le réservoir nutritif du végétal. La présence des hydrocarbures constitue une grave menace. L'effet de ces derniers est très divers et varié (Colin, 2000). La phytotoxicité des hydrocarbures, inhibe le développement de certains végétaux qui se manifeste à travers l'inhibition de la germination des graines et/ou la croissance végétative qui a un impact sur le rendement final (Koller, 2004).

I.5.2 Effets sur la santé humaine

L'effet des hydrocarbures dépend de la durée d'exposition plus particulièrement les HAP qui provoquent à long terme des troubles neurologiques et neurophysiologiques, de fait de leur pouvoir cancérogène, mutagène, tératogène. Par contre un contact cutané induit des érythèmes (Fattal, 2008).

L'effet dépendra aussi du temps d'inhalation, et de la possible consommation de produits contaminés. D'autres manifestations sont observées lors du nettoyage des milieux de déversement, notamment des douleurs aux jambes et des douleurs abdominales ainsi des troubles de sommeil (Fattal, 2008).

La toxicité des HAP est plus importante que celle des aliphatiques. Cependant les alcanes à faible poids moléculaire présentent un danger pour la santé. Par exemple, l'hexane lors d'une exposition prolongée, provoque une atteinte des nerfs périphériques conduisant à une paralysie de membranes inférieures (Battaz, 2009).

I.5.3 Effets sur l'environnement

A travers l'étude de l'évolution des hydrocarbures dans les phases liquide et gazeuse du sol, on peut dire que les terrains contaminés entraînent une extension de la contamination, que ce soit par voie aérienne (entraînement des poussières contaminées et

migration des vapeurs) ou souterraine (migration d'eaux contaminées), aux environs immédiats du site où peuvent habiter des populations humaines (Fattal, 2008).

I.6. Procédés de réhabilitation des sols contaminés

Ils consistent à épurer ou isoler un milieu qui a été exposé à une pollution dans le but de le traiter et le rendre utilisable pour des activités agricoles et domestiques (Koller, 2004).

I.6.1 Procédés thermiques

Consistent à porter le matériel pollué à haute température pour le détruire, l'extraire ou l'immobiliser (Lecomte, 1998). Ces procédés sont souvent dispendieux mais efficaces tant pour l'extraction que pour l'élimination. Les principales méthodes sont : l'incinération, la désorption thermique, la réduction thermique et l'inertage-stabilisation (Koller, 2004).

I.6.2 Procédés physiques

Ce sont des méthodes qui consistent à utiliser des fluides présents dans le sol ou injectés comme vecteur afin de transférer la pollution vers des points d'extraction (Colin, 2000). Les techniques les plus utilisées sont le lavage, le pompage-écrémage et le venting (Colin, 2000 ; Koller, 2004).

I.6.3 Procédés chimiques

Ils font appel à un principe réactionnel dans le but de transformer ou d'éliminer les polluants à l'aide des réactifs (Lecomte, 1998).

D'après Koller (2004), les technologies physico-chimiques utilisées sont souvent très coûteuses et provoquent d'importantes modifications des propriétés du milieu, ce qui incite à développer des méthodes biologiques car l'intérêt de ces dernières réside essentiellement dans la facilité de leur mise en œuvre ainsi que leur coût (Cardiere, 2006).

I.6.4 Procédés biologiques

Ce sont des techniques qui exploitent les propriétés d'un organisme vivant afin de réaliser l'opération de la dépollution. Il peut s'agir d'un microorganisme (bactérie, champignon) ou bien d'un végétal herbacé qui a le pouvoir d'agir sur le polluant par absorption, accumulation ou dégradation pour le rendre moins toxique (Cardière, 2006).

I.6.4.1 Bioremédiation : c'est l'utilisation des microorganismes généralement des bactéries endogènes ou exogènes sur le terrain contaminé afin de réduire la pollution (Cardière, 2006).

I.6.4.2 Phytoremédiation : elle regroupe toutes les techniques qui utilisent les végétaux comme épurateur du milieu. Le principe est de planter des végétaux supérieurs spécifiques afin de traiter la zone polluée ; ces végétaux vont transformer, dégrader ou stabiliser les polluants dans le sol (Lecomte, 1998). Il existe plusieurs mécanismes de phytoremédiation (tableau 1).

Tableau 1 : présentation des différentes phytotechnologies (Lecomte, 1998 ; Bert, 2007).

Techniques	Principe
Phytoextraction	Elle vise l'extraction et l'accumulation des contaminants présents dans les racines et les parties aériennes. <i>Thlaspi</i> et <i>Brassica</i> sont les plantes les plus utilisées.
Phytostabilisation	Consiste à piéger les polluants dans un réseau racinaire afin d'être accumulés et ainsi immobilisés. Généralement on utilise les plantes à racines fibreuses et profondes
Phytotransformation	Il s'agit de dégrader les polluants organiques complexes en composés plus simple pour qu'ils soient intégrés dans le tissu racinaire. Les arbres de la famille du saule, du peuplier ainsi que les herbes et les légumineuses sont les plus répandus.
Phytostimulation	C'est de stimuler la dégradation microbienne et fongique par les enzymes libérées dans la rhizosphère racinaire ce qui entraîne la destruction des polluants. Le plus souvent, on utilise <i>Brassica juncea</i> (moutarde) ainsi que les plantes marécageuses.

SCHNOOR et *al.* (2003) ont noté que les plantes peuvent absorber le contaminant pour le métaboliser ou le stocker, ce qui explique le risque de son transfert dans d'autres compartiments de l'environnement, d'où la nécessité de valoriser ces plantes.

Pour ce faire, la biomasse végétale produite lors de la phytoremédiation pourrait être utilisée dans la production de biocarburants.

II. Généralités sur les biocarburants

Les biocarburants représentent une source d'énergie renouvelable appelée énergie verte.

II.1 Définition des biocarburants

Ce sont des carburants renouvelables issus de la transformation des matières organiques non fossiles provenant de la biomasse. On distingue différents types de biocarburants qui peuvent être de 1^{ère}, de 2^{ème} ou de 3^{ème} génération ; cette distinction se fait par rapport à la matière première utilisée (Debiton, 2010).

II.2 Type de biocarburants

II.2.1 Biocarburants de 1^{ère} génération

Selon le mode de production, cette filière regroupe deux grands types de produits (figure1). La filière biodiesel et celle des alcools dont le plus connu est l'éthanol (Casimir, 2010).

Le biodiesel appelé aussi le biogazole est fabriqué par une transestérification d'huiles végétales issues des organes de réserve des cultures comme les graines de céréales ou des oléagineuses (colza et tournesol). Il est doté d'une capacité beaucoup plus importante que l'éthanol (Anonyme, 2007).

L'éthanol est obtenu à partir des plantes sucrières (betterave, canne à sucre) et de l'amidon des céréales (blé, maïs, orge) (Togbe, 2010).

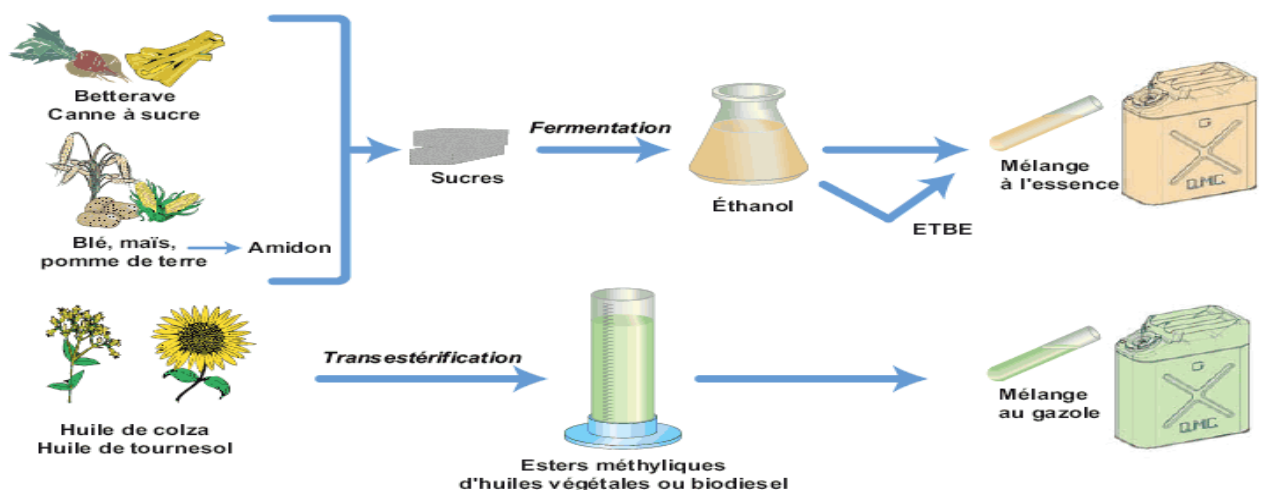


Figure1: filières de biocarburants de première génération (Berthier et al., 2013).

II.2.2 Biocarburants de 2^{ème} génération

La filière biocarburants dits de deuxième génération utilise une biomasse lignocellulosique comme matière première. Cette dernière présente l'avantage d'être non alimentaire, abondante et renouvelable (Anonyme, 2007).

La fabrication de ces biocarburants comporte une phase de gazéification de la biomasse et une synthèse de carburants à partir de ce gaz. La production de l'éthanol implique la conversion de cellulose en glucose (Anonyme, 2007).

II.2.3 Biocarburants de 3^{ème} génération

Ils sont obtenus à partir de l'utilisation de microorganismes tels que les micro-algues. Celles-ci peuvent accumuler des acides gras qui permettent de donner un meilleur rendement. A partir de ces acides gras on obtient un biodiesel (CDE, 2012).

Enfin, certaines de ses micro-algues contiennent des sucres qui peuvent être fermentés en bioéthanol (CDE, 2012).

II.3 Procédés de fabrication

II.3.1 Procèdes de fabrication des biocarburants 1^{er} générations

Les biocarburants de première génération reposent sur l'utilisation des organes de réserves de culture qui stockent le sucre et l'amidon ou l'huile (Tongong Mbendou, 2013).

II.3.1.1 Biodiesel

L'esther méthylique de l'huile végétale (EMHV) est obtenu par une transestérification d'huile issue des plantes avec du méthanol. Ce procédé consiste à éliminer l'eau et les polluants par une filtration, puis mélanger le produit avec du méthanol et un catalyseur (hydroxyde de sodium ou de potassium). Dans les huiles, les triglycérides se recombinent en ester et en glycérol qui sont ensuite séparés et purifiés (Debiton, 2010).

II.3.1.2 Ethanol

Sa production passe par une fermentation d'un substrat riche en sucre par des levures. Il est produit à partir de plantes sucrières ; son processus de fabrication comporte une transformation des matières celluloseuses (Debiton, 2010).

La fabrication de ce dernier à partir de plantes amylacées nécessite un broyage de la graine pour faciliter la liquéfaction de l'amidon. Cette technique est réalisée sous condition de haute températures et forte pression pour faire éclater la graine. Une saccharification est nécessaire pour la transformation de l'amidon en sucre simple fermentescible. A l'aide des levures une fermentation est réalisée dans des conditions anaérobiques, à une température de 35°C et une concentration de 8-12% tout en suivant la quantité de glucose (Debiton, 2010).

Enfin une distillation et déshydratation sont réalisées pour la séparation de l'éthanol des autres liqueurs afin d'obtenir un alcool pur (Bordeur et *al.*, 2007). Cela est résumé dans la figure 2.

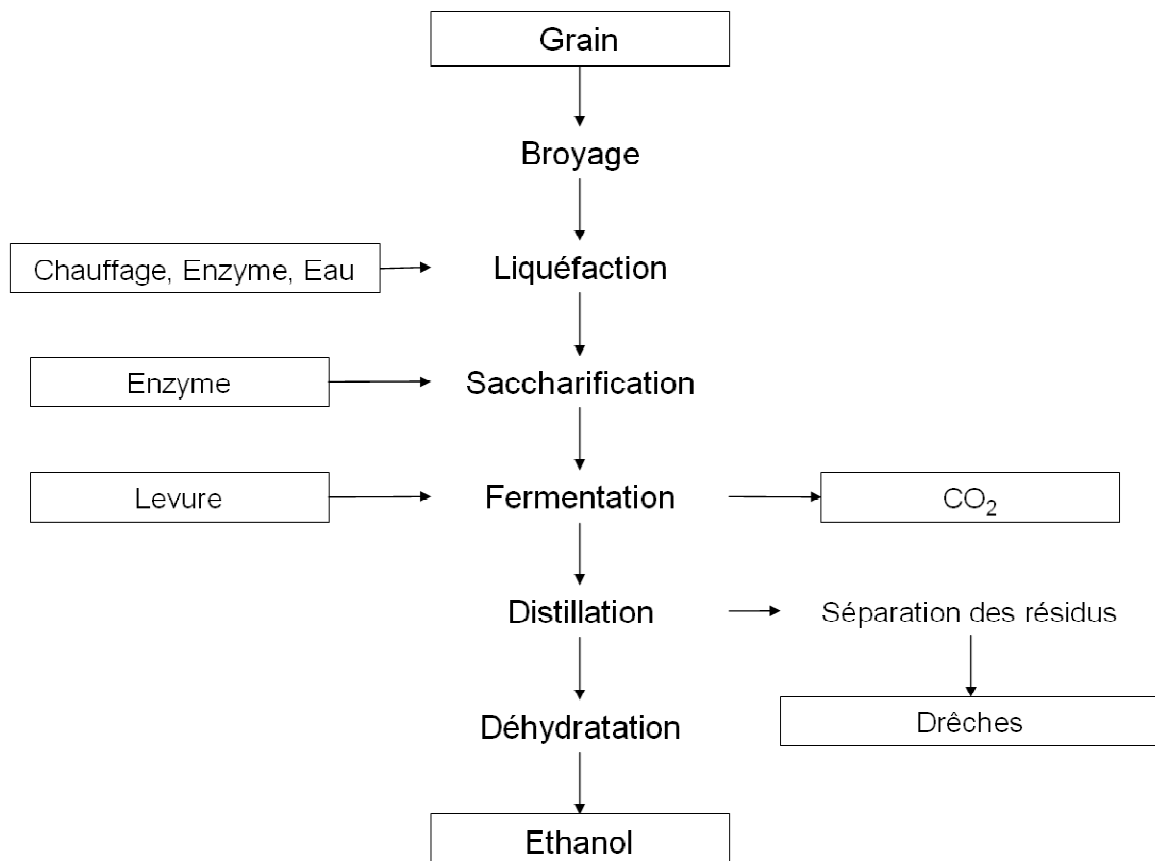


Figure 2 : Principales étapes de production du bioéthanol (Debiton, 2010).

II.2.2 Procédés de fabrication des biocarburants de 2^{ème} génération

L'intérêt principal des biocarburants de 2^{ème} génération est d'exploiter la totalité de la plante et résidus agricoles et forestiers (Derbali, 2007). Il existe deux voies de productions (figure 3).

II.2.2.1 La voie biochimique c'est la transformation des composants de la biomasse à savoir la cellulose et l'hémicellulose en éthanol (Togbe, 2010).

- **Prétraitement** : c'est un traitement qui permet de modifier les propriétés physiques et physicochimiques de la lignocellulose afin de la rendre accessible à l'hydrolyse (Derbali, 2007).
- **Hydrolyse** : c'est une étape qui permet d'hydrolyser la cellulose en monomères fermentescibles (glucose). Elle est réalisée soit par une hydrolyse chimique catalysée par un acide ou bien par une hydrolyse enzymatique pour transformer les chaînes cellulosiques en sucres fermentescibles (glucose, cellubiose) (Derbali, 2007).
- **Fermentation alcoolique** : c'est l'utilisation des levures généralement la levure *Sccharomyces cerevisiae* pour la fermentation du glucose en éthanol (Gramont, 2006).

II.2.2.2 La voie thermochimique: il s'agit de transformer la biomasse soit en huile par pyrolyse ou bien en un mélange riche en CO et H₂ (gaz de synthèse) par gazéification ; ce mélange sera ensuite transformé en carburant liquide (Togbe, 2010).

- **Pyrolyse** : c'est la conversion thermique des matières carbonées en absence de gaz de réaction pour obtenir trois phases valorisables sous forme solide (charbon), composé organique (huile de pyrolyse) et des produits gazeux (Cormeau et al. , 2008).
- **gazéification** : consiste à transformer la biomasse par l'action de la chaleur et en présence des réactifs oxydants (O₂, vapeur d'eau) (Cormeau et al. , 2008).

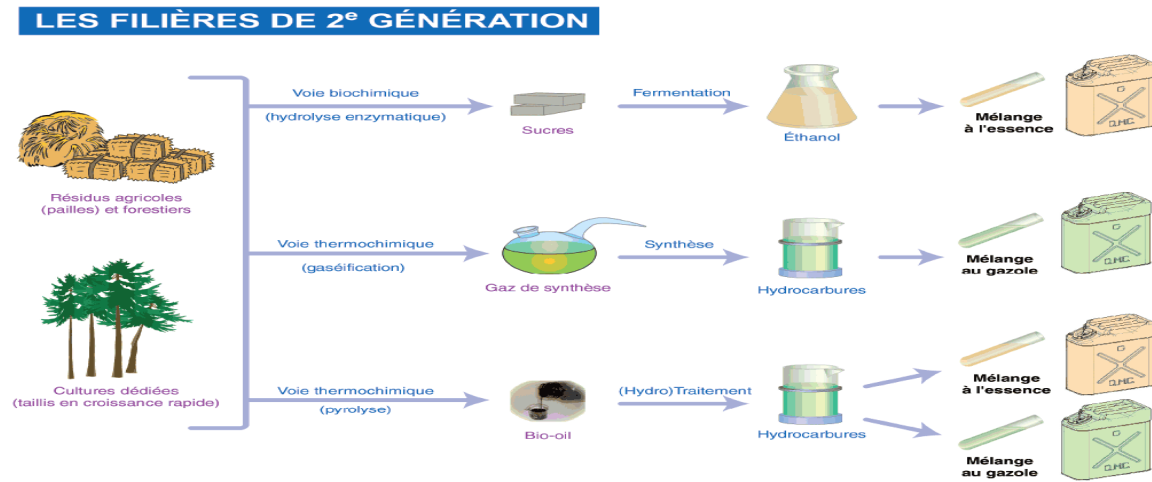
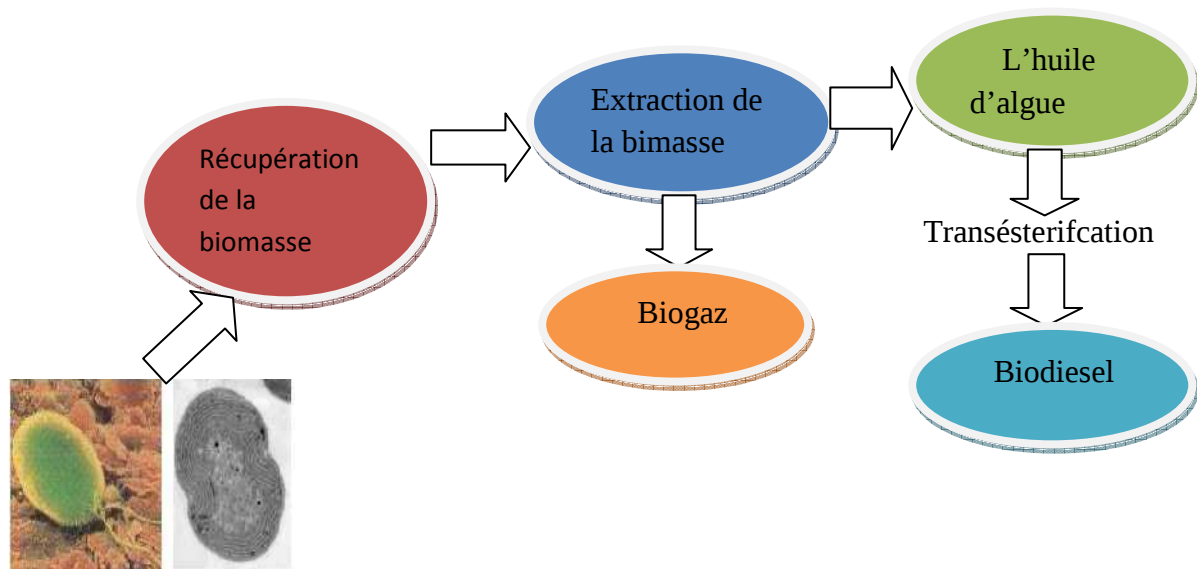


Figure 3: Voies de production des biocarburants de 2^{ème} génération (Berthier et al., 2013).

II.3. Procédés de fabrication des biocarburants 3^{ème} génération

La production de ces biocarburants consiste en une transestérification pour le biodiesel ou en une fermentation en bioéthanol pour les micro- algues qui contiennent des sucres (figure 4). Les micro- algues peuvent aussi être méthanisées pour produire de biogaz.

Les biocarburants de troisième génération ne sont encore qu'au stade de la recherche et de projets pilotes (Derbali, 2007)



Botryococcus braunii

Figure 4 : Schéma de production des biocarburants de 3^{ème} génération (Derbali, 2007).

Conclusion

Le travail réalisé a été mené en vue de mettre en valeur les plants utilisés en phytoremédiation et de traiter la possibilité de produire des biocarburants.

La biomasse récupérée après un essai de phytoremédiation en utilisant le maïs et le pois a servi à la production des biocarburants. En effet, nous avons réussi à produire du bioéthanol de 2^{ème} génération à partir d'une biomasse végétale du maïs et du pois cultivé sur sol pollué par les carburants qui est de 8.4g qui nous permet d'obtenir 27ml de bioéthanol qui présente un bon résultat par un procédé biochimique.

Par le biais d'une étude au laboratoire, quelques paramètres de la végétation ont été examinés afin de mettre en évidence la capacité du maïs et du pois à tolérer la pollution par l'essence et le gasoil.

D'après les résultats obtenus au cours de notre travail, nous pouvons conclure que l'action des carburants se révèle toxique sur le végétal. Cette action se traduit par une diminution de rendement végétal indiqué par l'abaissement de taux de levé qui présente une moyenne de 62.22 pour le maïs et 54.36 pour le pois ; et la hauteur des plantes qui est de 30.98cm pour le maïs et 34.54cm pour le pois ; et de la biomasse végétale qui donne la moyenne de 6.33g pour le maïs et 0.96g pour le pois. Toutefois les plantes ne meurent pas et résistent bien à cette pollution.

Nous avons constaté que le rendement de production du bioéthanol est relativement faible, cela est probablement dû à la voie de production utilisée.

Enfin, nous proposons les recommandations suivantes:

- ✓ de réaliser un essai sur terrain pour produire une biomasse plus importante ;
- ✓ d'utiliser d'autres procédés de production de biocarburants plus efficaces avec des rendements plus élevés.

Introduction générale

La pollution du sol est devenue un sujet d'étude incontournable en raison de son impact sur l'environnement et sur la santé publique. Cette pollution peut se définir comme une accumulation de plusieurs effets provoqués par les polluants anthropologiques sur divers transformations chimiques, physiques et biologiques se déroulant dans le sol (Koller, 2004). Elle est généralement causée par l'activité minière, pétrolière et d'autres activités industrielles (Cardière, 2006).

Le phénomène de pollution par les hydrocarbures a une importance de plus en plus grande sur les plans environnemental, sanitaire et économique (Soltani, 2004). En effet de nombreux dégâts réels ont été constatés lors d'accidents pétroliers, ainsi que les accidents des stations service causés principalement par le déversement des carburants, leurs composants et les lubrifiants qui engendrent une altération de la qualité du sol et du sous sol (Carnicer et *al.*, 2007).

La dépollution des sites contaminés est une préoccupation majeure, en raison de l'impact de cette pollution sur l'environnement et sur la santé, liée notamment à la propagation des molécules dangereuses dans le milieu et leur transfert dans les nappes phréatiques et dans la chaîne alimentaire. La mise en œuvre de nouvelles technologies sont en développement sur le terrain. Les techniques de traitement thermiques et physico-chimiques sont les plus répandues (Cardière, 2006), mais compte tenu des limites de ces techniques, il est nécessaire de faire appel à des moyens biologiques pour limiter les effets des hydrocarbures sur le sol (Bouderhem, 2011).

Il s'agit notamment d'identifier les techniques biologiques les plus avancées du point de vue des résultats obtenus en conditions réelles et de l'application sur le terrain. La plus efficace des techniques sur le plan environnemental et économique, consiste en l'utilisation d'organismes végétaux, dont le coût de revient est réduit par rapport aux autres techniques, c'est la phytoremédiation (Lecomte, 1998).

Selon Cardière (2006), la phytoremédiation utilise les propriétés de certaines espèces végétales telles que les strates herbacées à interagir avec des composées chimiques organiques afin de dépolluer un terrain contaminé. Schnoor et *al.*, (2003), ont noté que les plantes absorbent les contaminants et les stockent dans leurs organismes tels que certaines les légumineuses et quelques graminées ce qui nécessite l'incinération de ces

dernières ; mais cette solution n'est en réalité qu'un déplacement de la pollution et non son élimination .

Pour valoriser ces plantes, une utilisation dans la production de biocarburants peut être envisagée. Cette production sera réalisée à partir de toute la biomasse végétale. La production de biocarburants de deuxième génération paraît être la plus adaptée puisqu'elle utilise toute la biomasse lignocellulosique (Hohwiler, 2011).

Aussi, cette valorisation revêt un grand intérêt sachant que la production des biocarburants est une solution pour répondre à l'épuisement du pétrole et à la nécessité de réduire fortement les émissions anthropiques de CO₂ .

L'Algérie est située dans une zone vulnérable aux effets néfastes des changements climatiques. Donc sensible aux déséquilibres environnementaux engendrés par le réchauffement climatique dont plusieurs mémoires ont été réalisés dans ce domaine (Derbali en 2007). Et différents projets de CDER.

Pour faire face aux défis énergétiques et climatiques, le recours à des énergies renouvelables est inévitable, car l'utilisation rationnelle et durable de la biomasse peut remplacer une partie des ressources fossiles (Blotas et *al.*, 2008). Ainsi, en utilisant des plantes ayant accumulé des polluants, donc inutilisables pour d'autres fins, le problème de la concurrence avec les autres utilisations possibles serait réglé.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, 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.

L'objectif de notre travail consiste à évaluer la résistance d'espèces végétales (maïs et pois) à la contamination du sol par les hydrocarbures et donc leur capacité à dépolluer le sol et à essayer de valoriser ces plantes par la production de biocarburants .

Le travail est divisé en trois chapitres :

- ❖ Le premier chapitre traite le problème de la pollution du sol par les hydrocarbures et les méthodes utilisées pour sa réhabilitation, ainsi que des généralités sur les biocarburants.
- ❖ Le deuxième chapitre décrit les matériels et les méthodes utilisés pour la réalisation de notre expérience.

- ❖ Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et de leur discussion.

Le travail se termine par une conclusion générale.

1. **AIT AMAR K., ATTAR S., 2014.** Essai de phytoremédiation d'un sol contaminé par les boues de fourage. Mémoire de master en protection de l'environnement. UMMTO. 35p.
2. **ABDELLY C., 2007.** Bioremédiation / Phytoremédiation. Série N° 232. Université de Tunis Institut Supérieur de l'Éducation et de la Formation Continue Département des Sciences Naturelles.
3. **ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 2004.** Ecotoxicité des sols et des déchets. Résultats des tests biologique.96p. ADEME éditions.ADEME.www.ademe.fr/sites/pollué-et-sols.
4. **ANONYME, 2005.** Hydrocarbures aromatiques polycycliques. Rapport d'étude-N°66244-DESP-P02.108p.
5. **ANONYME, 2007.** Les biocarburants : les Etats-Unis misent sur l'éthanol. BIOFUTUR.N°279.72-73p.
6. **ANZALA F., 2007.** Contrôle de la vitesse de germination chez le maïs (Zea mays) : étude de la voie de biosynthèse des acides aminés issus de l'aspartate et recherche de QTLs. Biomolécules .Université d'Angers. French.149p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00181021>
7. **BATTAZ S., 2009.** Etude comparative de la dégradation d'une terre polluée par les hydrocarbures lourds. Mémoire Présenté à la faculté des sciences. Département des sciences fondamentales Pour l'obtention de diplôme de MAGISTER. 17p.
8. **BALLERINI D., 2007.** le plein de biocarburants : enjeux et réalité : Ed Technip, Paris.160p
9. **BALLERINI D., 2006.** les biocarburants : état des lieux, perspectives et enjeux de développement, Institut Français du pétrole.235p.

- 10.BERT V., 2007.** Sols pollués. La phytoremédiation, un procédé prometteur. Edition la Gazette.42p.
- 11.BERTHIER C., DELOULE V., 2013.** Microalgues pour biocarburants de 3^{ème} génération. Mémoire d'ingénieurs. <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/mémoire/2013/biocarburants-microalgue.htm>.
- 12.BLOTAS E., TISSERAND-BEDRI F., 2008.** Les biocarburants, étude réalisé par CNRS-INIST. 5p.
- 13.BOCARD C., 2006.** Marées noires et sols pollués par les hydrocarbures : enjeux environnementaux et traitement des pollutions. Edition TECHNIP. 295p.
- 14.BOUDERHEM A., 2011.** Utilisation des souches bactériennes telluriques autochtones dans la biodetection et la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister. Université kasdi merbah-Ouargla. 49 p.
- 15.BORDEUR C., CLOUTIER J., SYLVIAN P., 2007.**la production de l'éthanol à partir de graine de maïs et céréale. Centre de référence en agriculteur et agroalimentaire du Québec. Ed : Chantale, Ferland. Pp : 2-3, 14.
- 16.CADIERE F., 2006.** Traitement biologique des sols pollués, recherche et innovation Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'ADIT - Société Nationale d'Intelligence Stratégique Département Sites et Sols Pollués – Direction Déchets et Sols - ADEME (Angers). 32p.
- 17.PIEDRAFITA C., VICTORIA M., 2007.** La pollution ponctuelle des sols : Le cas des stations- service dans la région de Bruxelles- Capitale. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention grade académique en gestion de l'environnement. 154p.
- 18.CEA , 2005.** produire du carburants par transformation thermochimique de la biomasse. Clefs CEA- N°50/51- hiver.11p.

- 19.CDE 2012.** biocarburant. In Fondation d'entreprise Alcène pour la connaissance des énergies. Connaissance des énergies. <http://www.connaissancedesenrgies.org/fiche-pedagogique/biocarburants>.
- 20.CHAINEAU C. H., MORE J.L, et OUDOT J., 1996** .Land treatment of oil- Based drill cuttings in an agricultural soil. J. Environ. qual. v25, .Pp 858-86.
- 21.COLLIN. F., 2000.** Pollution des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Académie des sciences. TEC &DOC. Pp28 -266.
- 22.CORMEAU J., GOSSE G., 2008.** Les biocarburants de deuxièmes générations : Semer aujourd'hui les carburants de demain.
- 23.DEPARTE A., 2010.** Etude prospective sur la seconde génération de biocarburants. stage de fin d'étude. In ministère de l'economie et des finances. Trésor-direction générale. 51p
<http://www.tresor.economie.gouv.fr/file/326047>
- 24.DERBALI M.A., 2007.** Conception d'une bioraffinerie de seconde génération. Mémoire Master Académique en Raffinage et Technologie des Hydrocarbures.46p.
- 25.DEBITON C., 2010** . Identification des critères des grains de blé (*Triticum aestivum* . L) favorable à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble des cultures et par l'analyse proteonique de lignées isogénique waxy. Thèse se doctorat en physiologie et génétique moléculaire. Université de Palaise Pascal.274p.
- 26.DIAEA/DRHA/SEEN.,2008.** <http://www.imaterenvironsci.com>

- 27.DUCHAUFOR P., 1997.** Abrégé de pédologie .Sol, végétation, environnement, (Enseignement des Science de la Terre) ST. 5^e édition. Edition MASSON. 291 p.
- 28.DUCHAUFOR P., 2001.** Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6^{ème} édition MASSON, Paris Milan Barcelone. 498 p.
- 29.DUPONT G., 2010.** les plantes au service de la dépollution .Ed : Le monde.
- 30.FATTAL. P., 2008.** Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse universitaire de Renne. Pp80-82.
- 31.FERLAND C., LAGACE J., LAUZON L., 2008.** La production d'éthanol a partir des grains de maïs et de céréales.
- 32.GIDDENS J., 1976.** Spent motor oil effects on soil and crops. J. Environ. Qual., Vol. 5. N° 2. 179-181 pp.
- 33.GRAMMONT V., 2006.** Les biocarburants à partir de ressources lignocellulosique : présentation des filières et identification des risques laboratoire d'évaluation des matières dangereuses 12-20 :30.
- 34.HAMAD B. ,2009 .** Transésterification des huiles végétales par l'éthanol en condition douces par catalyses hétérogène acide et basique. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard. Lyon.195.
- 35.HELLER.R, ESNAULT R, LANCE C., 1995.** Physiologie végétales. Nutrition, 6^{ème} édition. DUNOD, paris.323p.
- 36.HOHWILLER C., 2011.** La production de carburant liquide par thermo conversion de biomasse lignocellulosique : évaluation pour le système énergétique Française future : thèse de doctorat en science des matières de l'ingénieur. Ecole nationale supérieure de mine de Paris. Ed : Paris, Tech .150p.

- 37.HOPKINS W.G., 2003.** Physiologie végétales. 2^{ème} édition. De Boeck, Bruxelles.514p.
- 38.KOLLER E., 2004.** Traitement des pollutions industrielle (eau, air ; déchet, sol, boues). Edition DUNOD. Paris. 284p.p48.
- 39.LAURENT C., FEIDT C et LAURENT F., 2005.** Contamination des sols : transferts des sols vers les animaux. EDP Sciences/ADEME. 216 p.
- 40.LECOMPTE. P ., 1998.** Traitement des sols et des eaux. 204Pp.
- 41.MAHLAL M. MOULA S., 2011.** Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis de deux plantes (*Zea mays* L., *Sorghum bicolor* L) et du sol : essai de phytoremédiation. Mémoire d'ingénieur en pathologie des écosystèmes. UMMTO. 88p.
- 42.NGO C. et REGENT A., 2004.** Déchets et pollution. Impact sur l'environnement et la santé. Ed DUNOD .Paris.134 p.
- 43.OUKACI M., LEKADIR F., 2014.** Effet de la contamination du sol par les carburants (essence normale, essence super, gasoil) sur la croissance de la nodulation du pois (*Pisum Sativum* L.).mémoire D.E.S en biologie et physiologie végétale. UMMTO. 38p.
- 44.SAADA A., NOWAK C. et COQUEREAU N., 2005.** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures rapport intermédiaire résultat de la phase 1.
- 45.SCHNOOR J.L., 1997.** Phytoremédiation, Technology Evaluation report prepared for Ground-Water Remediation Technologies Analysis center GWRTAC. P37.
- 46.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. 284 p.

- 47.SYLVIAN F., 2009.** Directeur de recherche et développement se Nasko environnement. Les biocarburants de troisième génération .Article 6323. Edition : Wika.
- 48.PERON J.Y., 2004.** Références production légumineuse. 2^{ème} édition.613p.
- 49.TOGBE C., 2010.** étude cinétique de l'oxydation de constituants de biocarburants et composés modèles- formation de polluants. Thèse de doctorat en chimie-physique. Université d'Orléans. 414p.
- 50.TOGNANE MBENDOU E.P., 2013.** Production de bioéthanol à partir des résidus de bois : Cas de MOIBI .Mémoire de DI.P.SII (licence de physique). 76p.
- 51.WANI M.C et WALL M. E., 1995.** In alkaloids, chemical and biological perspectives (S.W. Pelletier, ed), Vol. 9 pp. 1-22. Elsevier, New York.

Résumé :

L'objectif de notre travail est de tenter une dépollution d'un sol contaminé par les hydrocarbures par le biais d'une phytoremédiation en utilisant le maïs et le pois. Nous avons opté pour une valorisation de ces plantes à la fin de traitement par la production de biocarburant.

Les résultats obtenus ont montré que le maïs et le pois ont pu résister à la toxicité des hydrocarbures donc l'essai de phytoremédiation se révèle efficace. Comme les hydrocarbures peuvent passer dans la plante, nous avons réussi à produire de bioéthanol à partir d'une biomasse sèche.

Le rendement de bioéthanol reste faible cela est lié à la voie de production.

Abstract:

The aim of our work is to attempt a cleanup of soil contaminated by hydrocarbons through a phytoremediation using corn and peas. We opted for a valuation of these plants at the end of treatment with biofuel production.

The results showed that corn and peas could resist the toxicity of oil so the phytoremediation test is effective. As the oil may pass through the plant, we managed to produce bioethanol from a dry biomass.

Bioethanol yield remains low this is related to the way of production.