

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

Faculté Des Sciences Biologiques Et Des Sciences Agronomiques

Département Ecologie et de l'Environnement



Mémoire

En vue d'obtention du diplôme de

Master

En écologie et environnement

Spécialité : Biodiversité et environnement

Thème

**Étude de l'effet du gasoil sur la germination et la
croissance d'*Acanthus mollis L.* au laboratoire**

Présenté par : M^{elle} KHIMECHE Wissam
M^{elle} LAIB Lydia

Devant le jury composé de :

Présidente : M ^{me} . CHIBANE GOURAYA	M.A.A	U.M.M.T.O
Promotrice : M ^{me} . SADOUDI ALI AHMED DJAMILA	Professeur	U.M.M.T.O
Co-promoteur : M ^r . DIB DJAFFER	Docteur	U.M.M.T.O
Examineur : M ^r . SADOU SID Ali	M.C.B	U.M.M.T.O

Promotion : 2024/2025

Remerciements

En premiers, nous remercions le bon dieu le tout puissant de nous avoir donné santé, patience et courage pour mener à terme ce modeste travail.

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention d'un grand nombre de personnes. Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à son élaboration.

Nous remercions en particulier, notre promotrice Mme SADOUDI-ALI AHMED Djamila pour nous avoir proposé cette thématique et nous avoir encadré durant ce travail. Nous avons appris énormément avec elle et nous avons bénéficiés de ses précieux conseils, de sa grande expérience scientifique et de ses remarques très pertinentes. Et nous la remercions infiniment pour le grand intérêt qu'elle a portée à notre travail et aussi pour la confiance qu'elle a eu en nous.

Nous témoignons notre profonde gratitude à l'égard de Mr DIB Djaffer, notre Co-promoteur, pour son orientation, sa confiance et sa patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury Mme CHIBANE Gouraya et Mr SADOU Sid Ali, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Mme ABROUS Hassina l'ingénieur du laboratoire du département de l'Ecologie pour son accueil et son aide.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents les prunelles de mes yeux pour leur soutien moral et matériel tout au long de mes études
Que Dieu tout puissant me les protège et leur accorde une longue vie pleine de bonheur et de santé

À mes chers frères adorés Mohand et Lyes,
loin des yeux mais toujours dans mon cœur
Vous me manquez énormément

À mes grands-parents
À l'ensemble de ma famille et mes ami(e)s
À ma chère binôme et amie Lydia
À toutes les personnes qui m'ont soutenue
et encouragée pour réaliser ce modeste travail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents bien-aimés, véritables fondations de ma vie. À mon père, Ali, dont le courage silencieux m'a toujours inspirée. À ma mère chérie, Djamila, dont la tendresse, la patience et la force m'accompagnent à chaque pas. Que ce travail soit le reflet de vos prières exaucées, le fruit de votre amour et de vos sacrifices sans mesure.

À mes sœurs adorées, Karima, Tinhinane, Souhila, et à ma belle-sœur Khadidja, dont les mots réconfortants et la bienveillance ont éclairé mes jours de doute.

À mes frères, Moumouh, Saddek et Nadir, pour leur appui loyal, leurs encouragements constants et leur fierté partagée.

À mon amie et binôme, Wissam, avec qui j'ai partagé les rires, les difficultés et les beaux défis de cette aventure. Merci pour ta loyauté, ton humour et ta présence vraie.

À mes amis, pour leur sincère amitié, leur patience et leur soutien à chaque étape.

Et à tous ceux, visibles ou discrets, qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Lydia

Listes des figures

Figure 01. Structure moléculaire de base des principaux hydrocarbures pétroliers.....	4
Figure 02. Processus influençant le devenir des polluants dans les sols.....	9
Figure 03. Illustration descriptive des techniques de phytoremédiation.....	12
Figure 04. Plante adulte d' <i>Acanthus mollis</i>	15
Figure 05. Plantule de trois semaines.....	15
Figure 06. Tige d' <i>Acanthus mollis</i>	15
Figure 07. Feuille d' <i>Acanthus mollis</i>	16
Figure 08. Racine d' <i>Acanthus mollis</i>	16
Figure 09. Floraison d' <i>Acanthus mollis</i>	17
Figure 10. Fruit d' <i>Acanthus mollis</i>	17
Figure 11. Répartition d' <i>Acanthus mollis</i> en Europe et Afrique du Nord.....	17
Figure 12. Terreau à base de tourbe.....	18
Figure 13. Dispositif expérimental.....	20
Figure 14. Taux de germination moyen d' <i>Acanthus mollis</i> sur les différents sols contaminés et le témoin.....	23
Figure 15. Germination des graines d' <i>Acanthus mollis</i> dans le sol témoin après 6 semaines de culture.....	24
Figure 16. Germination des graines d' <i>Acanthus mollis</i> dans le sol contaminé à 2.5 % après 6 semaines de culture.....	24
Figure 17. Germination des graines d' <i>Acanthus mollis</i> dans le sol contaminé à 5 % après 6 semaines de culture.....	25
Figure 18. Germination des graines d' <i>Acanthus mollis</i> dans le sol contaminé à 7.5% après 6 semaines de culture.....	25

Figure 19. Germination des graines d' <i>Acanthus mollis</i> dans le sol contaminé à 10% après 6 semaines de culture.....	26
Figure 20. Variation de la longueur moyenne de la tige d' <i>Acanthus mollis</i> selon les doses d'hydrocarbures.....	27
Figure 21. Longueur moyenne de la partie racinaire d' <i>Acanthus mollis</i> dans le sol témoin et les sols contaminés par le diesel à différentes concentrations.....	28
Figure 22. Poids des racines en fonction du niveau de contamination.....	30

Liste des tableaux

Tableau 01 : Composition basique des hydrocarbures issus du pétrole.....	4
Tableau 02 : Propriétés physico-chimiques du gasoil.....	7
Tableau 03 : caractéristiques du terreau à base de tourbe.....	18
Tableau 04 : Taux de germination d' <i>Acanthus mollis</i> sous différentes doses de contamination.....	22
Tableau 05 : Synthèse des résultats sur la croissance de la tige d' <i>Acanthus mollis</i> sous différentes doses de contamination.....	26
Tableau 06 : Comparaison multiple des rangs moyens pour la croissance de la tige.....	27
Tableau 07 : Effet du niveau de contamination sur la longueur des racines.....	28
Tableau 08 : Comparaison multiple des rangs moyens pour la croissance racinaire.....	29
Tableau 09 : Poids moyen, maximal et minimal selon les niveaux de contamination.....	29
Tableau 10 : Comparaison multiple des rangs moyens pour le poids.....	30
Tableau 11 : Test de corrélations entre les niveaux de contamination et les paramètres de croissance des plantules.....	31

Liste des abréviations

BTEX : Benzène, Toluène, Ethylène, Xylène.

HAP : Les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

HC : Hydrocarbure.

D : Dose.

Table de matière

Introduction..... 1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1. Produits pétroliers et hydrocarbures..... 3

 1.1. Définition des hydrocarbures.....3

 1.2. Classification des hydrocarbures.....4

 1.2.1. Hydrocarbures aliphatiques.....5

 1.2.2. Hydrocarbures cycliques ou naphténiques.....5

 1.2.3. Hydrocarbures Aromatiques.....5

 1.3. Propriétés physiques des hydrocarbures.....6

 1.4. Gasoil.....7

 1.4.1. Définition.....7

 1.4.2. Propriétés physico-chimiques du gasoil.....7

2. Pollution du sol par les hydrocarbures..... 7

 2.1. Définition..... 7

 2.2. Contamination du sol par les hydrocarbures..... 8

 2.3. Principales sources d'hydrocarbures..... 8

 2.4. Devenir des hydrocarbures dans le sol.....9

3. Effets des hydrocarbures sur les espèces végétales.....10

 3.1. Effets sur la germination.....10

 3.2. Effets sur la croissance de la tige et les racines.....11

4. Coûts de la contamination des sols et des végétaux par les hydrocarbures.....11

5. Phytoremédiation.....12

 5.1. Définition.....12

 5.2. Techniques de phytoremediation.....12

 5.2.1. Phytoextraction.....13

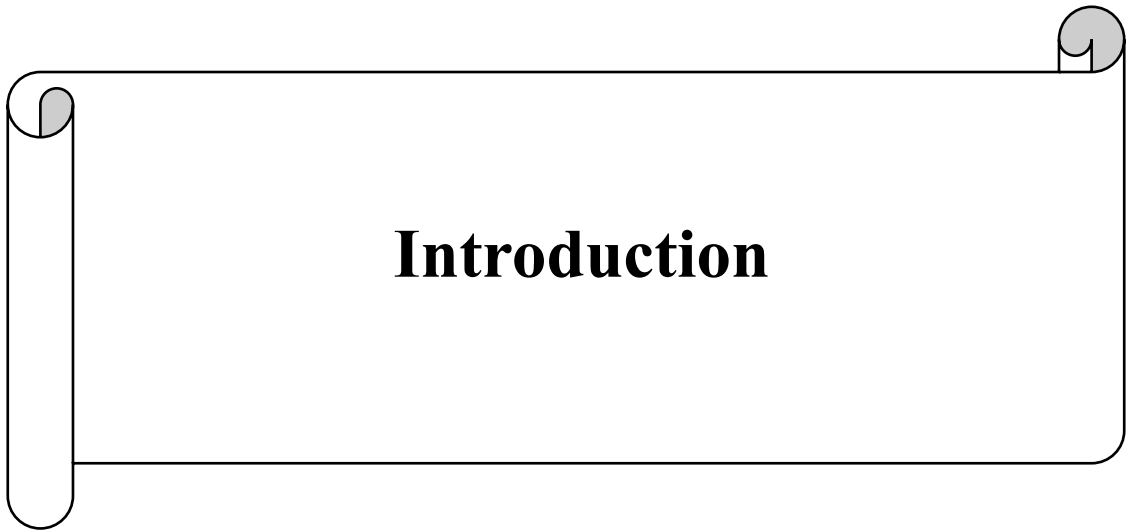
5.2.2. Phytotransformation ou Phytodégradation.....	13
5.2.3. Phytovolatilisation.....	13
5.2.4. Phytostimulation.....	13
5.2.5. Phytostabilisation.....	13
5.2.6. Rhizodégradation.....	13

Chapitre II : Matériels et méthodes

1. Matériels.....	14
1.1. Matériel biologique.....	14
1.1.1. Systématique.....	14
1.1.2. Description.....	15
1.1.2.1. Tige.....	15
1.1.2.2. Feuillage.....	15
1.1.2.3. Racines.....	16
1.1.2.4. Floraison.....	16
1.1.2.5. Fruit.....	16
1.1.2.6. Répartition géographique.....	17
1.2. Substrat utilisé.....	18
1.3. Produit pétrolier utilisé.....	19
1.4. Matériel de laboratoire.....	19
2. Méthodes.....	19
2.1. Préparation des échantillons.....	19
2.2. Semis.....	20
2.3. Mise en place de l'essai.....	20
2.4. Suivi de l'expérience.....	20
2.5. Récolte.....	20
2.6. Evaluation des effets des hydrocarbures sur la croissance des plantes.....	20
2.7. Méthodes d'analyse statistique.....	21

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Résultats.....	22
1.1. Taux de germination.....	22
1.2. Croissance.....	26
1.2.1. Longueur de la partie aérienne.....	26
1.2.2. Longueur de la partie racinaire.....	28
1.2.3. Poids des plantules d' <i>Acanthus mollis</i>	29
2. Discussion.....	31
Conclusion et perspectives.....	34
Références bibliographiques.....	35



Introduction

Depuis toujours, l'homme influence de manière directe ou indirecte l'environnement. Cette influence s'est intensifiée au fil des derniers siècles avec l'essor de l'industrie et les avancées dans les domaines scientifiques et techniques, qu'ils soient liés à l'industrie, à l'agriculture ou aux activités domestiques. Ainsi, pendant des années, les activités humaines ont contribué à la dégradation des écosystèmes en rejetant toujours plus de polluants, affectant ainsi l'eau, l'air et le sol (Norini, 2007).

Le sol est l'une des trois composantes majeures de la biosphère. Il joue un rôle crucial en contribuant à la bonne qualité de l'environnement, non seulement parce que c'est une composante de celui-ci, mais également par son impact sur la qualité de l'air et de l'eau (Calvet, 2003).

La contamination du sol par les hydrocarbures peut influencer l'équilibre écologique et parfois entraîner la destruction des écosystèmes ainsi que l'érosion de la biodiversité (Yuniati, 2018). Les hydrocarbures sont très répandus dans l'environnement, leur principale source est le pétrole, mais ils sont aussi formés par des procédés biologiques ou de synthèse (Weisman, 1998). La contamination compromet la qualité des sols, les ressources naturelles, la flore, les micro-organismes et la santé humaine (Ramade, 1992).

La pollution des sols par des dérivés du pétrole est souvent observée dans les sols municipaux autour des installations industrielles et dans les zones où l'on obtient du pétrole et du gaz naturel (Njoku et al., 1999). Les méthodes de décontamination des sols sont de type physico-chimique ou biologique. La sélection d'une ou plusieurs techniques de traitement est fonction de critères liés au lieu, au matériau à traiter et aux buts de la réhabilitation (Henner, 2000). Le nettoyage des sites contaminés par les hydrocarbures fait généralement appel aux procédés physiques, chimiques et thermiques (Njoku et al., 1999).

La dépollution des sols contaminés par les hydrocarbures est un processus coûteux, nécessitant souvent des investissements importants et des délais considérables pour atteindre des résultats significatifs. Cependant, des alternatives plus durables et économiques émergent pour répondre à ces défis. La phytoremédiation, une technologie écologique, pourrait représenter une réponse prometteuse aux défis posés par la dépollution des sols contaminés par les hydrocarbures. Cette méthode évalue la capacité des végétaux à supprimer et/ou réduire la pollution des sols par les hydrocarbures (Shirdan et al, 2008).

Plusieurs études ont analysé l'impact des hydrocarbures sur la germination et la croissance des plantes. Njoku et al. (1999) ont analysé l'impact du diesel sur *Zea mays et Vigna unguiculata*, tandis que Shirdan et al. (2008) ont exploré la phytoremédiation avec *Helianthus annuus*. Dib et Ali Ahmed (2019 et 2024) ont, quant à eux, examiné l'impact du gasoil sur la germination et la croissance de *Xanthium strumarium L.*, *Daucus carota*, *Avena sativa* et *Cerithe major*. Cependant, peu de recherches ont porté sur *Acanthus mollis*, une plante d'intérêt écologique et médicinal. Notre travail comble cette lacune en évaluant sa sensibilité au gasoil et son impact sur la germination et la croissance des jeunes plants.

Dans ce cadre, nous analysons les effets de cette contamination sur le développement d'*Acanthus mollis* afin d'évaluer sa phytotoxicité et sa tolérance en milieu pollué. Cette évaluation est essentielle pour identifier la capacité de cette espèce à se développer en milieu pollué et pour envisager des stratégies de phytoremédiation adaptées.

Originnaire du bassin méditerranéen, *Acanthus mollis* est une plante herbacée pérenne qui peut atteindre entre 90 et 150 cm. Elle s'épanouit sur des sols fertiles, bien drainés et tolère différentes conditions environnementales. Son adaptabilité et sa résistance aux variations climatiques en font un sujet d'étude pertinent pour évaluer son potentiel en phytoremédiation (Hadjine, I., et Kadri, H. 2020).

Le présent mémoire est scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre : présente un aperçu bibliographique sur les hydrocarbures, en général et sur le gasoil, en particulier, ainsi que leurs effets sur la végétation ;
- Le deuxième chapitre : aborde les caractéristiques générales de l'espèce utilisée, ainsi que la description du matériel et des méthodes mises en œuvre pour sa réalisation ;
- Le troisième chapitre : sera consacrée aux résultats des différents tests ainsi que leur discussion ;

Enfin, nous clôturerons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.



**Chapitre I : Synthèse
bibliographique**

1. Produits pétroliers et hydrocarbures

Les produits pétroliers sont issus du raffinage du pétrole brut, une technique qui implique la séparation de ce dernier par distillation afin d'extraire différentes fractions pétrolières. Chaque fraction obtenue correspond à un assemblage complexe de composés organiques, défini par une fourchette de température d'ébullition. Plus le point d'ébullition est haut, plus le composé a un poids important et une volatilité réduite (Jean-Pierre, 1998). Le pétrole brut reste la principale source d'énergie mondiale. C'est l'un des mélanges les plus complexes de composés organiques qui existent sur notre planète.

1.1. Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques qui ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène, leur formule brute est C_nH_m , (Fattal 2008 ; Le corfec, 2011). On les retrouve dans des combustibles fossiles tels que le pétrole et le gaz naturel. Ils se divisent en deux principales catégories : les hydrocarbures saturés (alcane) et les hydrocarbures insaturés (alcènes et alcynes). De plus, ils se classifient en deux familles principales : les aliphatiques, qui comprennent des groupes non cycliques avec des chaînes linéaires ou ramifiées et des groupes cycliques, et les aromatiques, qui incluent les hydrocarbures aromatiques monocycliques (BTEX) et polycycliques (HAP) (Pascal, 2003).

Les hydrocarbures sont couramment employés comme sources d'énergie, dans le secteur de la chimie et pour la production de plastiques. Néanmoins, l'utilisation de ces ressources engendre des conséquences environnementales significatives, en particulier la pollution et le réchauffement de la planète (Guillet, 2000).

Les HC regroupent différents produits pétroliers (pétrole brut, pétrole raffiné, Kérosène, fuel ordinaire, huile moteur) (Colombano et al., 2014). Ils constituent la part la plus significative d'un brut pétrolier et ils correspondent à environ 65 à 95% de la majorité des pétroles bruts (Morgan, 1994).

Afin de mieux comprendre la répartition des hydrocarbures dans les produits pétroliers, le tableau (1) présente la composition basique des hydrocarbures issus du pétrole

Tableau 01 : Composition basique des hydrocarbures issus du pétrole (Speight., 2014).

Elément	Pourcentage
Carbone	83 à 87 %
Hydrogène	10 à 14 %
Azote	0.1 à 2 %
Oxygène	0.05 à 1.5 %
Soufre	0.05 à 6 %
Métaux	< 0.1 %

1.2.Principales classes d'hydrocarbures

Les hydrocarbures constituent la part prédominante d'un pétrole brut, représentant généralement entre 65 et 95 % de la composition de la plupart des pétroles bruts (Neff, 1979). On peut classer ces hydrocarbures en diverses catégories en fonction de leur provenance géographique et géologique (figure 01) (Tissot et Welte, 1984).

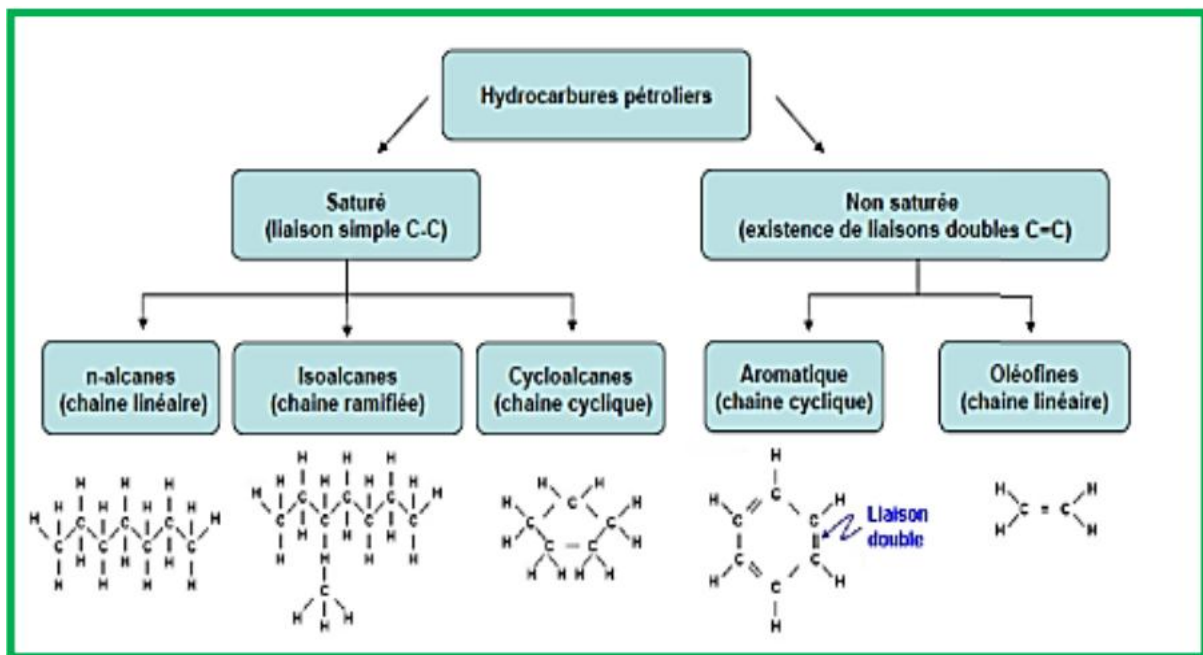


Figure 1. Structure moléculaire de base des principaux hydrocarbures pétroliers (Colombano et al., 2008).

1.2.1. Hydrocarbures aliphatiques

Les hydrocarbures aliphatiques sont les composants majeurs du pétrole brut et des produits pétroliers, ils sont des dérivés du méthane doté de structures en chaîne ouverte, qu'elles soient linéaires ou ramifiées, saturées (alcane) ou insaturées (alcène ou alcyne). On les utilise fréquemment comme des agents pour dégraisser et des solutions de nettoyage industriel (Su et al., 2013 ; Rajajayavel et Ghoshal, 2015).

1.2.2. Hydrocarbures cycliques ou naphténiques

Ils renferment des composés cycliques (à 5 ou 6 atomes de carbone) saturés (Soltani, 2004). On parle principalement de cyclanes et de cyclo-alcane, leur formule générale étant $(CH_2)_n$ ou C_nH_{2n} (Lefebvre, 1978). Ils se subdivisent en deux catégories selon la nature de la liaison :

- **Les cyclènes** : les molécules contiennent une liaison double dans le cycle carboné ;/
- **Les cyclynes** : des composés très instables qui possèdent une triple liaison au sein du cycle.

1.2.3. Hydrocarbures Aromatiques

Il s'agit de composés organiques classés selon la présence de deux à six cycles aromatiques, avec ou sans substituants alkyles, disposés en structures linéaires, compactes ou angulaires. Ces substances sont le résultat final du raffinage du pétrole brut ; elles constituent, en général, entre 26 et 30% des éléments présents dans le pétrole (Koshlaf et al., 2017).

1.3. Propriétés physiques des hydrocarbures

Les hydrocarbures se caractérisent par un groupe de propriétés physiques essentielles qui sont cruciales pour leur identification, leur classification et leur interaction avec différents milieux.

- **La viscosité**

La viscosité d'un hydrocarbure définit sa résistance à l'écoulement. Elle influe directement sur la perméabilité au niveau du sol. Elle est fondamentalement caractérisée par la proportion de composés lourds et légers que les pétroles contiennent (Colin, 2000). En effet, plus la température diminue, plus la viscosité augmente. Elle a, par conséquent, un impact sur les processus d'émulsification et d'évaporation des hydrocarbures (CEAEQ, 2015).

- **Point d'écoulement**

Le point d'écoulement est la température à laquelle un produit commence à s'écouler. À basse température, les paraffines cristallisent, augmentant la viscosité et empêchant l'écoulement des hydrocarbures, surtout des mazouts lourds (CEAEQ, 2015).

- **Densité**

La densité varie avec la longueur des chaînes carbonées. La plupart des hydrocarbures (C5 à C26), s'accumuleront sélectivement en surfaces de la nappe (densité inférieure à 1) et les hydrocarbures les plus lourds (fuel lourd) s'accumuleront au plancher de celle-ci (densité supérieure à 1) (Lemière, 2001).

- **Solubilité**

La solubilité désigne la faculté d'une substance à se dissoudre dans l'eau. Cette caractéristique est essentielle pour les hydrocarbures, car certains d'entre eux, lorsqu'ils sont solubilisés, peuvent devenir toxiques pour les êtres aquatiques, même à des concentrations très faibles (CEAEQ, 2015).

- **Point d'éclair, ou point d'inflammabilité**

Le point d'éclair, ou point d'inflammabilité, est la température à partir de laquelle un produit dégage suffisamment de vapeur pour former avec l'air un mélange inflammable au contact d'une flamme ou d'une étincelle (CEAEQ, 2015).

- **Point d'ébullition**

Chaque fraction d'hydrocarbures possède une température spécifique pour son évaporation. Les fractions légères s'évaporent à des températures plutôt basses, inférieures à 20°C°, alors que les hydrocarbures lourds nécessitent des températures plus élevées, au-delà de 100°C° (Fattal, 2008).

- **Tension superficielle**

Selon Fattal (2008), la température influence la tension superficielle, ce qui aide à comprendre plus précisément la vitesse de propagation des nappes d'hydrocarbures. Plus la température s'accroît, plus la tension de surface se réduit et plus la rapidité d'étalement est élevée. Dans cette situation, l'expansion affecte une grande superficie.

1.4. Gasoil

1.4.1. Définition

Selon Adam et Duncan (1999), le gasoil un assemblage complexe d'hydrocarbures comprenant des alcanes à faible poids moléculaire et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Le gasoil est un produit beaucoup moins volatil que les essences, puisque sa distillation se situe entre 160 et 380°C environ. Il renferme probablement plus de 1 000 hydrocarbures différents, contenant chacun de 10 à 20 atomes de carbone par molécule (CISS, 2003). Le diesel est couramment employé comme source d'énergie dans les moteurs à combustion par compression (Colombano et al., 2014).

Les principales propriétés physico-chimiques du gasoil sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques du gasoil (Colombano et al., 2014).

Température d'ébullition	Solubilité dans l'eau	Masse volumique à 15°C	Limites d'explosivité dans l'air	Pression de vapeur saturante
170-390 °C	Très peu soluble	0.82-0.89g/cm ³ (820-890g/l)	Inférieure : 1%vol Supérieure : 6%vol	1hPa à 20°C

2. Pollution du sol par les hydrocarbures

2.1. Définition

La pollution est une altération néfaste de l'environnement naturel qui se manifeste en totalité ou partiellement comme le résultat des activités humaines, à travers des effets directs ou indirects modifiant les modalités de distribution des flux d'énergie, les niveaux de radiation, la composition physico-chimique de l'environnement naturel et la profusion des espèces vivantes (Ramade, 1992).

Ces modifications peuvent avoir un impact direct sur l'homme ou par le biais des ressources en produits agricoles, en eau et autres biens biologiques. Elles peuvent également le toucher en dégradant les objets matériels qu'il possède, en entravant les potentialités artistiques de l'environnement ou même en ternissant la beauté naturelle (Fréjaville, 2009).

2.2. Contamination du sol par les hydrocarbures

La pollution du sol est définie comme l'accumulation des composés toxiques persistants tels que les produits chimiques, les sels, les matières radioactives ou les agents pathogènes dans

le sol qui ont des effets néfastes sur la croissance des plantes et la santé animale (Hateb et al., 2012).

La contamination du sol par les hydrocarbures (HC) est le résultat de déversements, intentionnels ou non, de produits pétroliers. Elle est due à la fois à la pollution chimique et à la pollution organique. On qualifie de polluants ces éléments qui ont un impact défavorable sur la fertilité du sol (Koller, 2004).

La pollution par les hydrocarbures légers largement utilisés (essence, kérosène, gasoil, solvants) est très courante. Leurs présences dans le sol provoquent, généralement une baisse de la perméabilité du sol et un ralentissement de la circulation de l'eau à travers la matrice (Collin, 2000).

Un polluant du sol est tout facteur qui détériore la qualité, la texture et la teneur en minéraux du sol ou qui perturbe l'équilibre biologique des organismes du sol (Havugimana et al., 2017).

2.3. Principales sources d'hydrocarbures

La pollution des sols par hydrocarbures peut être accidentelle ou chronique. La plupart des contaminants organiques sont générés par l'activité humaine. Néanmoins, certains contaminants peuvent avoir une origine naturelle.

- **Sources naturelles**

Les feux de forêt et de prairie sont perçus comme les phénomènes les plus significatifs dans la production d'hydrocarbures. Cependant, on peut également citer d'autres processus comme les éruptions volcaniques, l'érosion des roches et la production d'hydrocarbures par les plantes supérieures (cires) ou par les algues (Jumeau, 1999).

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

- **Sources anthropiques**

- ✓ **Activités industrielles**

Il s'agit des accidents, incidents ou anomalies diverses, lors de l'extraction, du stockage, de la transformation et du transport de matières premières, de produits ou de déchets dangereux, ou lors de la distribution des produits dangereux.

On peut aussi avoir des transferts de pollution issus des rejets atmosphériques ou aqueux, vers les sols.

✓ Activités urbaines

Ces activités sont en lien avec des activités artisanales ou commerciales utilisant ou engendrant des produits et déchets dangereux au même titre que les activités industrielles.

Il peut s'agir aussi de retombées atmosphériques de nombreuses sources de pollution atmosphériques dans les villes ou à leur périphérie comme les usines d'incinération ou les véhicules motorisés.

✓ Activités agricoles

Ces activités font référence à l'épandage de déchets ou de produits dérivés en agriculture, ainsi que, les activités d'élevage.

2.4. Devenir des hydrocarbures dans le sol

Le comportement des hydrocarbures dans le sol est influencé par leurs caractéristiques, notamment leur capacité à se dissoudre, leur biodégradabilité ou dégradabilité chimique, leur volatilité et leur propension à être adsorbés. Les hydrocarbures peuvent se fixer aux particules solides du sol ou se dissoudre partiellement dans l'eau qu'il contient. Ils peuvent être transportés vers les végétaux en parallèle avec leurs nutriments et/ou être lessivés jusqu'à atteindre la nappe phréatique (Bliefert et Perraud, 2001). Les facteurs de la dégradation dépendent de la nature du pétrole et du milieu ambiant. Ceux qui entraînent les modifications chimiques sont la photo-oxydation et la biodégradation (Fattal, 2008). La figure 2, illustre ces processus et leurs interactions dans l'environnement.

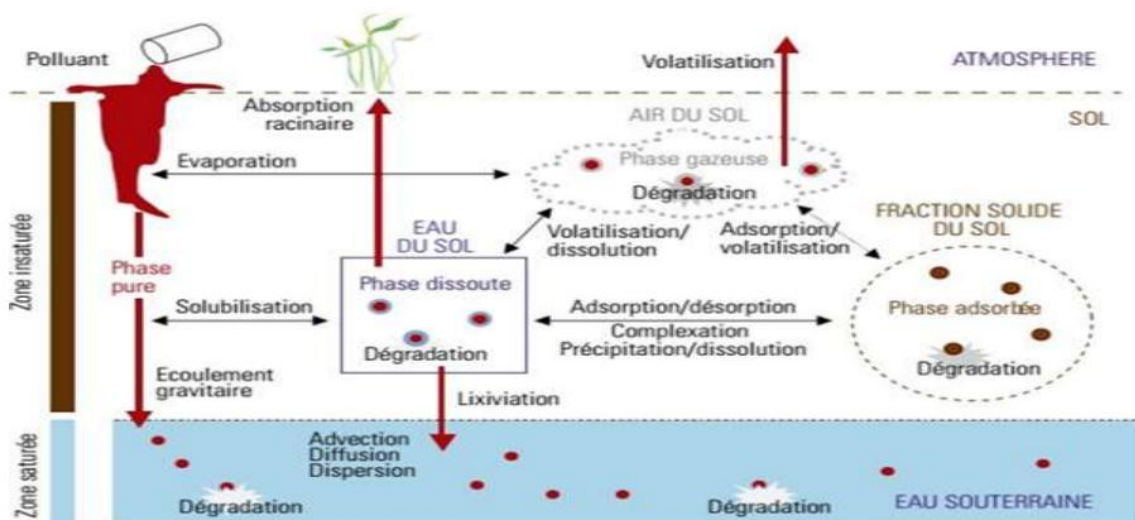


Figure 2. Processus influençant le devenir des polluants dans les sols (Maes et al., 2007).

1. Effets des hydrocarbures sur les espèces végétales

Selon Fattal (2008), le sol sert à la fois de support et de réservoir pour les plantes. Ainsi la présence d'hydrocarbures dans le sol peut avoir un impact direct sur celles-ci.

Les hydrocarbures ont des impacts toxiques variés sur les plantes, qui diffèrent selon les espèces. Ces effets peuvent aussi dépendre de la concentration. On a constaté l'impact des hydrocarbures par la baisse du taux de germination et de productivité, ainsi que par un retard dans le développement des plantes (Chaîneau et al., 1996 ; Henner et al., 1999).

Le contact entre le produit pétrolier et la surface foliaire des végétaux entraîne des dégâts notamment des dommages immédiats sous forme de brûlures des parties aériennes et la réduction des échanges entre la plante et l'atmosphère. La nutrition et le métabolisme des plantes sont perturbés. Certaines espèces végétales, non tolérantes, disparaissent (Mortet, 2019).

L'ampleur de l'impact est influencée par le type d'hydrocarbures, la durée du contact et surtout le degré de toxicité. Les hydrocarbures légers présentent une toxicité supérieure aux hydrocarbures lourds et sont, souvent, plus présents dans les hydrocarbures déversés (Fattal, 2008).

3.1. Effets sur la germination

Les hydrocarbures pétroliers sont reconnus comme destructeurs et menaçants pour la biodiversité aérienne et souterraine. De plus, leur présence dans le sol affecte la germination des graines, la croissance et le développement des plantes (Das et Mukherjee, 2007 ; Bona et al. 2011; Asghar et al., 2013). Les dommages dépendront de plusieurs facteurs, comme l'âge de la contamination du sol, le niveau de contamination, et le type d'espèces (Bona et al., 2011 ; Adam et Duncan, 2002).

Adedokun et Ataga (2007) ont également montré que le traitement des sols avec du pétrole brut, de l'essence automobile et de l'huile moteur usagée affectait de manière significative le moment de la germination, le pourcentage de germination, la hauteur de la plante, la production de feuilles, et retarderait ainsi la germination et le taux de croissance.

Henner et al. (1999), a été signalé que les hydrocarbures pétroliers, constitués de petites molécules présentent une phytotoxicité plus forte sur la germination.

3.2. Effets sur la croissance de la tige et les racines

- **Racines**

Les hydrocarbures s'infiltrant dans le sol et peuvent toucher le système racinaire et limiter les échanges gazeux entre les racines et le sol. En effet, c'est par le biais de leurs racines que les plantes vivaces se régénèrent (Koller, 2004).

Plusieurs recherches ont démontré que la pollution par les hydrocarbures entraîne une diminution de la longueur des racines. En effet, Tang et al., (2011), ont rapporté que l'allongement des racines était sensible à la contamination par les hydrocarbures pétroliers.

- **Tige**

Selon Molina-Barahona et al. (2005), le déplacement d'alcanes de longue chaîne vers les parties aériennes de la plante pourrait provoquer une diminution de la longueur du tronc. L'impact de la contamination par des hydrocarbures sur le rapport C/N peut influencer la croissance des plantes (Adam et Duncan 2002).

4. Coûts de la contamination des sols et des végétaux par les hydrocarbures

Le coût est un critère crucial dans le choix d'une technologie d'assainissement, surtout lorsque plusieurs options atteignent le même niveau d'efficacité dans le délai imparti. Parmi les facteurs influençant ces coûts, le mode de traitement (*in situ* ou *ex situ*) joue un rôle central, chaque méthode ayant ses propres implications financières et opérationnelles (Ahmed et al., 2022).

Les approches *ex-situ* sont souvent coûteuses en raison de l'excavation, du remblayage, du transport et du traitement centralisé des sols contaminés, mais offrent un meilleur contrôle sur les facteurs d'assainissement. Les méthodes *in-situ* peuvent être économiquement avantageuses, comme le chauffage par micro-ondes (18-27 €/t) pour les hydrocarbures, mais leur efficacité dépend des conditions du site (Ahmed et al., 2022).

Les amendements peuvent augmenter les coûts initiaux, mais ils améliorent les performances et réduisent la durée du traitement. Par exemple, un consortium bactérien a permis d'économiser 200 000 \$ par rapport à l'incinération prévue (Ahmed et al., 2022).

La gestion des déchets générés pendant l'assainissement entraîne des frais supplémentaires, comme le traitement des eaux usées et des boues, selon la technique utilisée.

5. Phytoremédiation

5.1. Définition

La phytoremédiation se définit comme l'emploi des végétaux pour supprimer ou convertir les contaminants en substances moins toxiques. Elle s'appuie principalement sur les interactions entre les végétaux, le sol et les micro-organismes pour réduire, dégrader ou fixer des composés organiques ou inorganiques polluants (Reeves et al., 2001 ; Schwartz et al., 2006).

La phytoremédiation est une méthode qui exploite le potentiel inné des plantes à stabiliser, extraire, transférer, volatiliser ou éliminer les substances toxiques et les polluants présents dans le sol, les sédiments ou l'eau. Cette technologie est utilisée, *in situ* ou *ex situ*, pour éliminer les

métaux, pesticides, solvants, explosifs, hydrocarbures, radionucléides, etc. (Pivetz, 2001, Usepa, 2001, Sait et al., 1995). Ils peuvent entraîner des diminutions du pourcentage de germination, des retards de croissance et des chutes de rendement (Leyval et Binet, 1998; Kummerova et Kmentova, 2004).

5.2. Techniques de phytoremédiation

Au sein du processus de phytoremédiation, les plantes entrent en interaction de diverses façons avec les polluants (Figure 03).

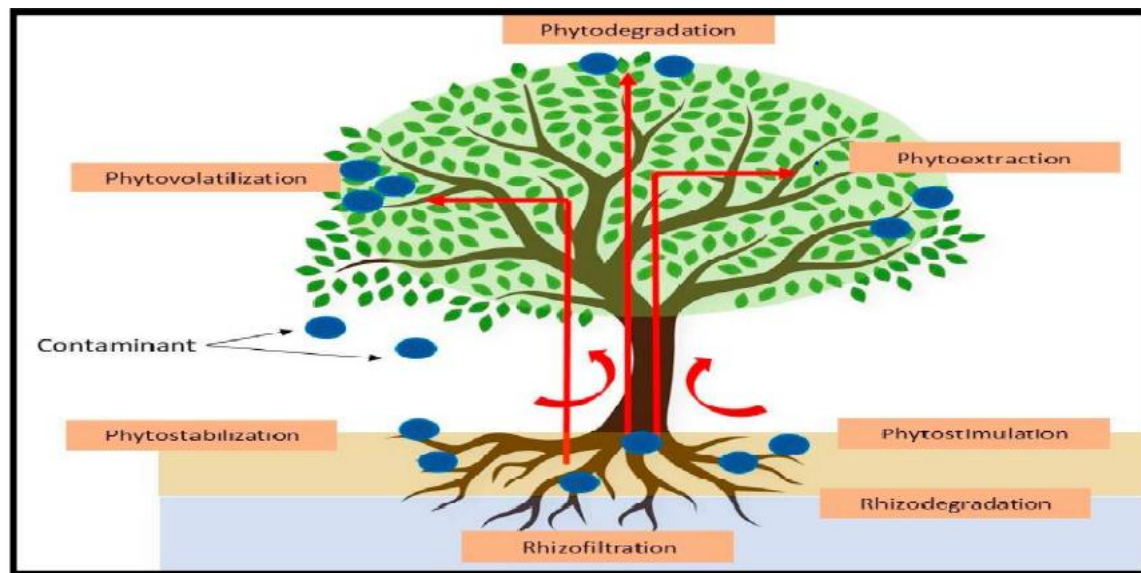


Figure 3. Illustration descriptive des techniques de phytoremédiation (Favas et al., 2014).

5.2.1. Phytoextraction

Ce processus nécessite la suppression du polluant du sol et son accumulation dans une section de la plante (par exemple, la racine, la tige ou la feuille) (Sidhu et al., 2018).

5.2.2. Phytotransformation ou Phytodégradation

Une fois le contaminant absorbé par la plante, celle-ci le métamorphose en une forme moins toxique. Cette transformation peut aussi se réaliser à la surface de la plante (Park et al., 2011).

5.2.3. Phytovolatilisation

Au cours de cette démarche, la plante élimine le contaminant du sol et réussit, par la suite, à le métamorphoser en une substance volatile, la diffusant dans l'air (Bob Mueller, 2020).

5.2.4. Phytostimulation

Les plantes libèrent des composés (exsudats) par leurs racines, qui peuvent favoriser la décomposition de certains polluants. Quand des micro-organismes participent à la décomposition, on désigne ce procédé global sous le nom de phytostimulation (Borriss, 2020).

5.2.5. Phytostabilisation

Cette procédure implique la fixation des contaminants dans le sol, ce qui empêche les processus d'érosion et favorise leur association avec l'humus et la lignine (Kaushal et al., 2015).

5.2.6. Rhizodégradation

Les microorganismes de la rhizosphère, tels que les champignons, les bactéries et les levures, présentent une activité métabolique 10 à 100 fois plus intense que celle du sol. Cette capacité leur offre la possibilité de décomposer efficacement les contaminants tout en assimilant des nutriments organiques naturels (Cristaldi, 2020).



**Chapitre II: Matériel et
méthodes**

Notre travail a été effectué au sein du laboratoire PSEMRVC de la Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Dans cette partie, nous exposerons les équipements et les techniques employées, ainsi que le dispositif expérimental mis en œuvre.

1. Matériels

1.1. Matériel biologique

Pour la réalisation de notre étude, nous avons utilisé les graines de l'espèce *Acanthus mollis*.

1.1.1. Systématique

La classification botanique de l'espèce *Acanthus mollis* selon Cronquist (1981) est présentée ci-dessous :

Règne	<u>Plantae</u>
Sous-règne	<u>Tracheobionta</u>
Division	<u>Magnoliophyta</u>
Classe	<u>Magnoliopsida</u>
Sous-classe	<u>Asteridae</u>
Ordre	<u>Scrophulariales</u>
Famille	<u>Acanthaceae</u>
Genre	<u>Acanthus</u>
Espèce	<i>Acanthus mollis</i> (Linné 1753).

1.1.2. Description

Acanthus mollis est une plante herbacée vivace de la famille des Acanthacées, originaire de la région méditerranéenne du Portugal et du nord-ouest de l'Afrique aux Balkans. Elle est aussi appelée acanthe molle ou acanthe à feuilles larges (Matos et al., 2018).

Cette espèce est à la fois valorisée pour ses propriétés ornementales et médicinales (Jara et al., 2017). Utilisée dans la préparation de cataplasmes pour traiter les brûlures, elle sert également en gargarismes pour apaiser les douleurs dentaires et les inflammations buccales. Elle possède de très grandes feuilles (30-80 cm de long), molles, à divisions larges, lobées, dentées et arbore une coloration, vert brillant (Wolf et al., 1985). C'est une plante pérenne capable de survivre plusieurs années, même en l'absence de graines (Figure 4).



Figure 4. Plante adulte d'*Acanthus mollis* (Tela Botanica, eFlore – *Acanthus mollis* L., Tison, D, 2023).

1.1.2.1. Tige

La tige est robuste, dressée et généralement simple. Elle est arrondie et porte des feuilles inférieures pétiolées (Figure 6).



Figure 5. Plantule de trois semaines (Originale, 2025).



Figure 6. Tige d'*Acanthus mollis* (Tela Botanica, eFlore – *Acanthus mollis* L., Tison . D, 2023).

1.1.2.2. Feuillage

Il est vert foncé pouvant atteindre 1 mètre de longueur et presque autant de largeur. Il est luisant et profondément lobées et dentées, mais non épineux (Figure 7). Se déployant en été, la grappe porte de nombreuses fleurs blanches bordées de pourpre.

Se déployant en été, la grappe porte de nombreuses fleurs blanches bordées de pourpre.

1.1.2.3 Racines

La racine est épaisse, fibreuse, horizontale, de 50 à 70 centimètres, droite, ferme, un peu anguleuse et pubescente (figure 8).



Figure 7. Feuille d'*Acanthus mollis*

(Tela Botanica, eFlore – *Acanthus mollis* L.,
Tison, D, 2023).



Figure 8. Racine d'*Acanthus mollis*

(Originale, 2025).

1.1.2.4. Floraison

La période de floraison s'étend de mai à août, durant laquelle des inflorescences imposantes se dressent en forme d'épis (Figure 9). Ces dernières sont constituées de fleurs blanches à crèmes.

1.1.2.5. Fruit

Le fruit d'*Acanthus mollis* est une capsule loculicide ovoïde qui mesure environ 2 à 3,5 cm de longueur (Figure 10). Une fois mûre, cette capsule dure éclate et libère entre 2 et 4 grandes graines de couleur noire ou brun-rougeâtre. Ces dernières sont bosselées et rugueuses, avec une taille approximative de 12 à 15 mm.



Figure 9. Fleurs d'*Acanthus mollis*



Figure 10. Fruit d'*Acanthus mollis*

(Tela Botanica, eFlore – *Acanthus mollis* L., Tison. D, 2023)

1.1.2.6. Répartition géographique

Cette plante méditerranéenne se trouve sur les continents européens et africains (plus précisément en Europe méridionale et en Afrique du Nord) (Figure 11).

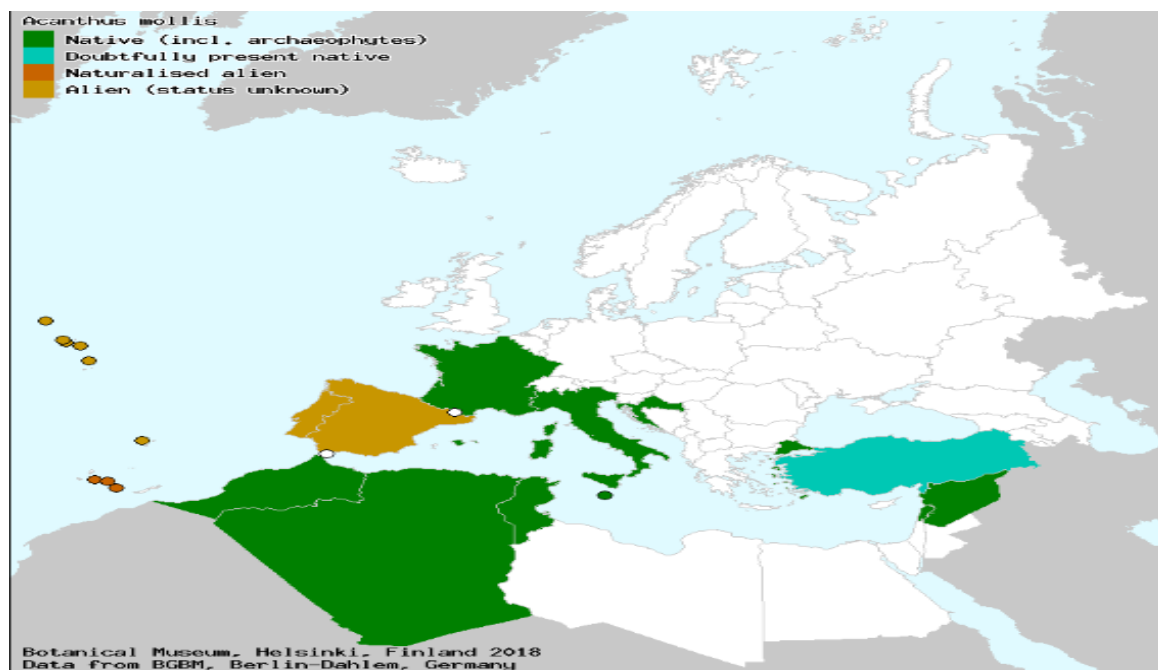


Figure 11. Répartition d'*Acanthus mollis* en Europe et Afrique du Nord.

(Botanical Museum, Helsinki, Finland, 2018).

1.2. Substrats utilisés

➤ Terreau à base de tourbe

Le terreau à base de tourbe est un substrat horticole principalement composé de tourbe, qui est une matière végétale fossile. Elle se forme progressivement dans des milieux très spéciaux appelés tourbières. La tourbe se forme par la décomposition lente de végétaux dans des milieux humides, dépourvus d'oxygène. Le milieu est alors asphyxiant (Office français de la biodiversité (OFB), 2022).

Le terreau à base de tourbe est souvent utilisé pour les cultures sensibles comme les semis ou les plantes nécessitant un sol bien drainé. Cependant, en raison des enjeux environnementaux liés à l'extraction de la tourbe, de nombreuses alternatives écologiques sont désormais privilégiées (Office français de la biodiversité (OFB), 2022).



Figure 12. Terreau à base de tourbe (Office français de la biodiversité (OFB), 2022).

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques physico-chimiques du terreau à base de tourbe.

Tableau 3 : Caractéristiques du terreau à base de tourbe. Les données sont fournies par le fabricant du terreau (la société Rekyva).

Conductivité électrique	0,1-0,3 mS/cm
NPK (sans chlore)	0
PH	5,5-6,5

1.3. Produit pétrolier utilisé

➤ Gasoil

Selon Adam et Duncan (1999), le gasoil est un mélange complexe d'hydrocarbures qui inclut à la fois des alcanes de faible masse moléculaire et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ce carburant diesel a été obtenu à partir d'une station-service locale.

1.4. Matériel de laboratoire

- Bécher de 250 ml
- Balance de précision
- Règle graduée
- Eau distillée
- Tamis
- Truelle
- Pots en plastique de 15 cm de hauteur sur 15 cm de diamètre.

2. Méthodes

L'étude consiste en une évaluation de l'effet de différentes concentrations en gasoil sur la culture *d'Acanthus mollis*.

Nous nous sommes intéressés aux indicateurs de croissance suivants : Taux de germination, longueur et poids de la partie aérienne et racinaire.

Ainsi, cette étude nous permet d'évaluer le degré de tolérance de l'espèce végétale choisie-aux différentes concentrations du gasoil.

2.1. Préparation des échantillons

Le terreau a été tamisé dans un tamis à mailles de 2 mm de diamètre. Nous avons utilisé 300 grammes de terreau dans chaque pot de germination. Nous avons préparé plusieurs niveaux de contamination en utilisant la méthode masse/masse :

- (D1) = Le témoin (0% de diesel)
- (D2) = 2,5% de diesel : nous avons pesé 2.5*3g de diesel (7.5g de diesel + 292.5g du sol).
- (D3) = 5% de diesel : nous avons pesé 5*3g de diesel (15g de diesel + 285g du sol).
- (D4) = 7,5% de diesel : nous avons pesé 7.5*3g de diesel (22.5g de diesel + 277.5g du sol).
- (D5) = 10% de diesel : nous avons pesé 10*3g de diesel (30g de diesel + 270g du sol).

Nous avons effectué trois répétitions pour chaque concentration de polluant. Un échantillon témoin est préparée aussi avec répétitions.

2.2. Semis

Nous avons semé 10 graines d'*Acanthus mollis* par pot, pour un total de 30 graines pour chaque niveau de contamination.

2.3. Mise en place de l'essai

Le semis a été réalisé le 07/04/2025, suivi d'un arrosage destiné à évacuer l'air entre les particules du sol, favorisant ainsi une bonne germination des graines (Figure 13).

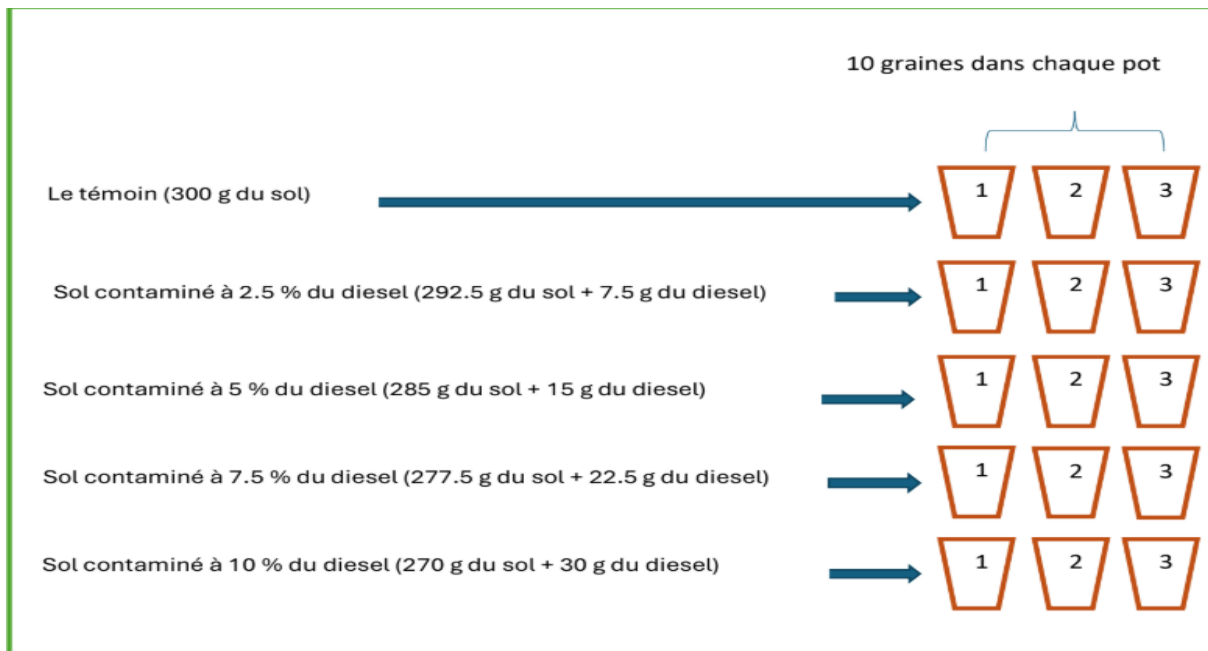


Figure 13. Dispositif expérimental.

2.4. Suivi de l'expérience

Le terreau a été humidifié immédiatement après le semis, puis maintenu régulièrement humide à l'eau de robinet durant toute l'expérimentation, en fonction des besoins du sol.

La germination, les longueurs et les poids des racines et des tiges ont été mesurés à la fin de l'expérience. L'expérience a duré 6 semaines.

2.5. Récolte

La récolte a eu lieu le 19/05/2025.

2.6. Evaluation des effets des hydrocarbures sur la croissance des plantes

Afin d'évaluer les effets du gasoil sur *Acanthus mollis*, nous avons analysé différents paramètres de croissance.

- **Taux de germination**

Le taux de germination dans chaque pot est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Taux de germination} = (\text{nombre de graines germées} / \text{nombre de graines semées}) \times 100$$

l'aide d'une règle graduée.

- **Poids des racines et des tiges**

C'est la prise des poids des racines et des tiges des plantes de chaque pot avec une balance de précision.

2.7. Méthodes d'analyse statistique

Nous avons utilisé le logiciel Statistica pour effectuer les tests d'ANOVA nécessaires pour interpréter nos résultats, complété par les tests post-hoc de Newman-Keuls pour mettre en évidence les groupes homogènes.



Chapitre III : Résultats et discussion

1. Résultats

Dans ce travail, nous avons examiné la réaction d'*Acanthus mollis* face à la pollution par le diesel, en mesurant divers indicateurs. L'évaluation du taux de germination, de la croissance des tiges et des racines, ainsi que de la biomasse aérienne, a été réalisée dans le but de comprendre dans quelle mesure cette espèce peut tolérer diverses concentrations de polluants et d'en mesurer les effets sur son développement global.

1.1. Taux de germination

Le tableau 04 montre que la germination d'*Acanthus mollis* reste optimale aux faibles doses de contamination (D1, D2 et D3 avec 100 %). À partir de D4 (7,5 %), une légère baisse est observée (96,6%), et devient plus marquée avec D5 (80 %, minimum 50 %). Ces résultats suggèrent que les hydrocarbures commencent à impacter la germination à forte concentration, ralentissant l'établissement des plantules.

Tableau 4 : Taux de germination d'*Acanthus mollis* sous différentes doses de contamination.

Dose	Moyenne (%)	Minimum (%)	Maximum (%)	Ecart-Type
D1	100	100	100	0,00
D2	100	100	100	0,00
D3	100	100	100	0,00
D4	96,6	90	100	0,57
D5	80,0	50	100	2,64
Total	95,3	50	100	1,30

Le graphique ci-après représente la fluctuation du taux de germination en fonction des niveaux de contamination. Il souligne les divergences constatées dans le tableau tout en offrant une illustration visuelle précise des impacts des hydrocarbures sur la germination des graines.

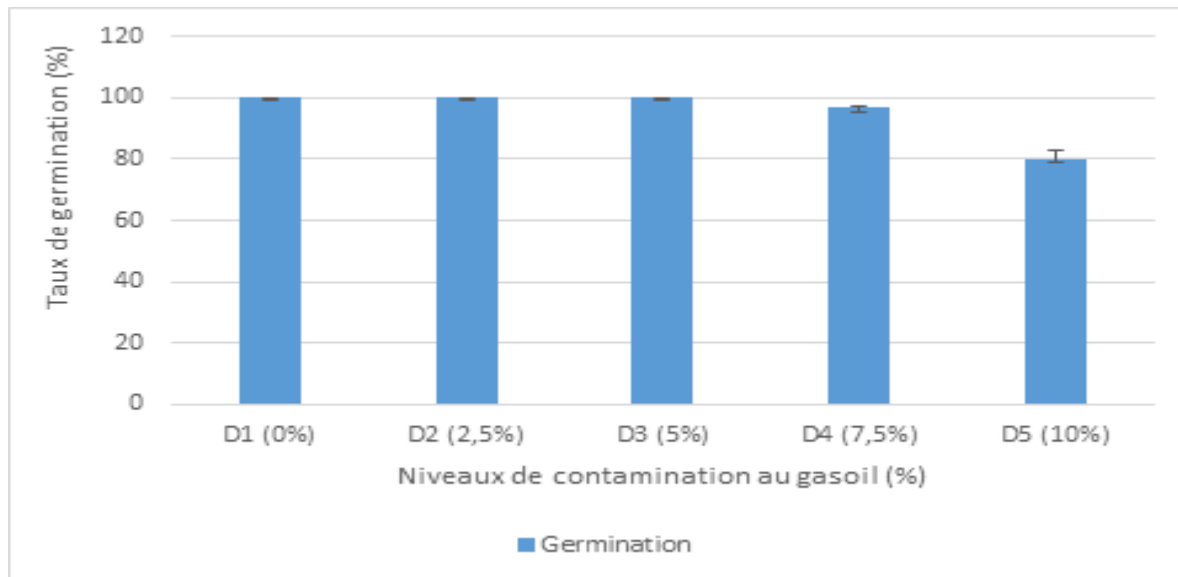


Figure 13 : Taux de germination moyen d'*Acanthus mollis* sur les différents sols contaminés et le témoin.

Nous avons observé un retard de germination des graines d'*Acanthus mollis* dans les sols contaminés par les hydrocarbures, quelle que soit la concentration (2.5 %, 5 %, 7.5 % et 10 %), par rapport au témoin. Les graines présentes dans le sol non contaminé ont montré une germination plus rapide, alors que celles soumises aux hydrocarbures ont nécessité plus de temps pour atteindre leur pic de germination. Ce retard est encore plus marqué aux concentrations de 7.5 % et 10 %, suggérant un impact grandissant de la pollution sur le développement précoce des graines.

Le test de Kolmogorov-Smirnov et Lilliefors utilisé pour la vérification de la normalité révèle des p-values inférieures à 0,01 pour tous les paramètres étudiés. Ces résultats indiquent que les données ne suivent pas une loi normale, ce qui a nécessité l'utilisation de tests non paramétriques appropriés pour l'analyse.

Le test statistique de Kruskal-Wallis appliqué aux données du taux de germination indique une p-value de 1,000, ce qui est largement supérieur au seuil de signification de 0,05. Cela suggère qu'aucune différence statistiquement significative n'est observée entre les niveaux de contamination, ce qui implique que la présence de diesel dans le sol n'affecte pas directement le taux de germination d'*Acanthus mollis*.

Les figures 14 à 18 montrent la germination des graines d'*Acanthus mollis* dans le sol témoin et les sols contaminés par le gasoil à différentes concentrations.



Figure 14 : Germination des graines d'*Acanthus mollis* dans le sol témoin après 6 semaines de culture.



Figure 15 : Germination des graines d'*Acanthus mollis* dans le sol contaminé à 2.5 % après 6 semaines de culture.



Figure 16 : Germination des graines d'*Acanthus mollis* dans le sol contaminé à 5 % après 6 semaines de culture.



Figure 17 : Germination des graines d'*Acanthus mollis* dans le sol contaminé à 7.5% après 6 semaines de culture.



Figure 18 : Germination des graines d'*Acanthus mollis* dans le sol contaminé à 10% après 6 semaines de culture.

1.2. Croissance

1.2.1 Longueur de la partie aérienne

Les résultats montrent que la longueur de la tige d'*Acanthus mollis* diminue progressivement avec l'augmentation de la contamination par les hydrocarbures. Le témoin (D1) se distingue par une meilleure croissance, avec une moyenne de 15.40 cm, et des valeurs extrêmes variant entre 4 et 19.50 cm. Une baisse importante est notée à partir de 2.5 et 5%, avec des moyennes respectives de 3.06 et 1.73 cm, et des valeurs minimales de 0 cm (développement seulement de la racine). Cette diminution devient encore plus marquée aux doses de 7.5 % et surtout 10 %, où on observe une forte dégradation de la croissance, atteignant des moyennes de 2.18 et 1.03 cm avec des minima de 0 cm (Tab. 5).

Tableau 5 : Synthèse des résultats sur la croissance de la tige d'*Acanthus mollis* sous différentes doses de contamination.

Dose	Moyenne (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Ecart-Type
D1	15,40	4,00	19,50	3,28
D2	3,06	0,00	10,00	2,46
D3	1,73	0,00	4,00	1,32
D4	2,18	0,00	6,00	1,47
D5	1,03	0,00	3,00	1,18
Total	4,68	0,00	19,50	5,80

Certaines graines exposées aux hydrocarbures n'arrivent pas à germer, ce qui met en évidence l'effet de la contamination sur le développement aérien des jeunes pousses, avec une relation proportionnelle à la quantité de polluants.

La figure 19 représente les longueurs moyennes de la tige en relation avec les quantités de contamination.

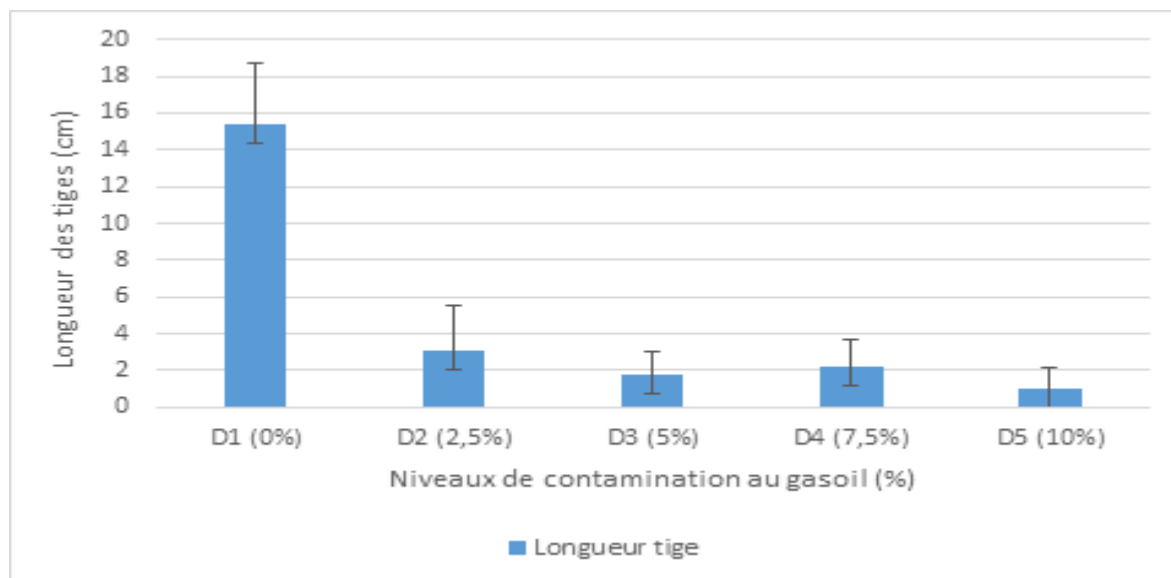


Figure 19 : Variation de la longueur moyenne de tige d'*Acanthus mollis* selon les doses d'hydrocarbures.

Nous observons sur le graphe une diminution nette de la longueur de la tige avec l'augmentation de la dose d'hydrocarbures. Les faibles concentrations présentent une croissance modérée, tandis qu'au-delà de 7.5 % (D4), la courbe montre un ralentissement marqué du développement.

La p-value est inférieure à 0,05 (0,0000), de ce fait il existe une différence significative entre les différents niveaux de contamination. La comparaison multiple des rangs moyens entre tous les groupes est représentée dans le tableau 6. Elle révèle des différences entre la dose 1 et toutes les autres doses, et aussi entre la dose 2 et la dose 5.

Tableau 6 : Comparaison multiple des rangs moyens pour la croissance de la tige

	D1	D2	D3	D4	D5
D1		0,000002	0,000000	0,000000	0,000000
D2	0,000002		0,966957	1,000000	0,011092
D3	0,000000	0,966957		1,000000	1,000000
D4	0,000000	1,000000	1,000000		0,180858
D5	0,000000	0,011092	1,000000	0,180858	

1. 2.2. Longueur de la partie racinaire

La longueur racinaire reflète l'impact des hydrocarbures sur le développement des plantules, influençant leur fixation et leur capacité d'absorption des nutriments.

D'après les résultats obtenus (Tab. 7), la valeur moyenne la plus élevée a été notée au niveau du témoin (0%) avec 22,21 cm, tandis que la plus faible a été enregistrée au niveau de la contamination à 10% avec 1,97 cm. La longueur maximale (30,00 cm) a aussi été observée chez le témoin (D1), tandis que la longueur minimale (0,00 cm) a été notée aux doses de 7,5 et 10%. Lorsque la dose augmente, on observe une tendance générale à la diminution de la longueur des racines, ce qui confirme un effet inhibiteur des hydrocarbures sur la croissance racinaire. Cette réduction pourrait limiter l'absorption des nutriments et la stabilité de la plante, affectant ainsi son développement global.

Tableau 7 : Effet du niveau de contamination sur la longueur des racines.

Dose	Moyenne (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Ecart-Type
D1	22,21	15,00	30,00	3,94
D2	2,69	0,40	5,00	1,49
D3	2,86	0,50	9,00	1,60
D4	2,41	0,00	4,00	0,93
D5	1,97	0,00	4,30	1,34
Total	6,43	0,00	30,00	8,20

La longueur moyenne de la partie racinaire d'*Acanthus mollis* ayant poussé dans le sol témoin et les différents niveaux de contamination est présentée dans la figure (20).

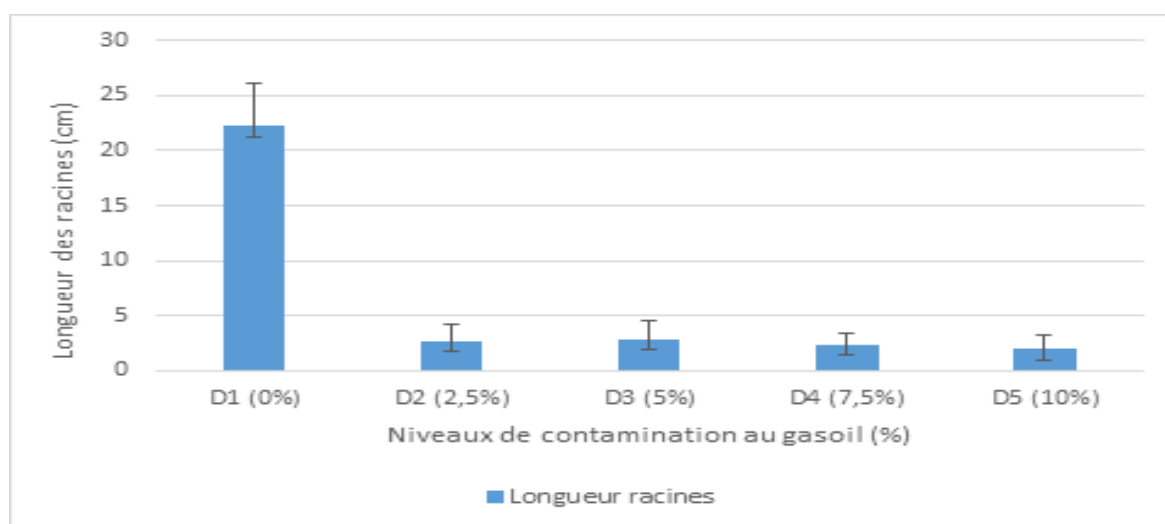


Figure 20 : Longueur moyenne de la partie racinaire d'*Acanthus mollis* dans le sol témoin et les sols contaminés par le diesel à différentes concentrations.

L'analyse statistique montre une p-value inférieure à 0,05 (0,0000), ce qui confirme une différence significative entre les niveaux de contamination. La comparaison multiple des rangs moyens (Tab. 8) révèle que le témoin (D1) se distingue nettement de toutes les autres doses, avec des différences statistiquement significatives ($p < 0,05$). En revanche, les groupes contaminés (D2 à D5) ne présentent aucune variation significative entre eux ($p = 1,000$).

Tableau 8 : Comparaison multiple des rangs moyens pour la croissance racinaire.

	D1	D2	D3	D4	D5
D1		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
D2	0,000000		1,000000	1,000000	1,000000
D3	0,000000	1,000000		1,000000	1,000000
D4	0,000000	1,000000	1,000000		1,000000
D5	0,000000	1,000000	1,000000	1,000000	

1. 2.3. Poids des plantules d'*Acanthus mollis*

Selon les résultats rapportés dans le tableau 9, la valeur moyenne la plus élevée a été enregistrée chez le témoin (0%) avec 3,79 g, tandis que la plus faible a été observée au niveau du sol contaminé à 10% avec 1,47 g. La valeur maximale (5,18 g) a également été notée au niveau du témoin, et la valeur minimale (0,00 g) au niveau du sol contaminé à 10%. On observe une tendance à la diminution du poids avec l'augmentation des doses de contamination, ce qui indique un impact négatif sur le développement des plantes.

Tableau 9 : Poids moyen, maximal et minimal selon les niveaux de contamination.

Dose	Moyenne (g)	Minimum (g)	Maximum (g)	Ecart-Type
D1	3,79	1,27	5,18	0,89
D2	1,83	1,15	3,23	0,49
D3	1,80	1,14	2,84	0,40
D4	1,75	1,17	2,32	0,28
D5	1,47	0,00	2,45	0,72
Total	2,13	0,00	5,18	1,03

L'évolution du poids moyen d'*Acanthus mollis* en fonction des niveaux de contamination est illustrée par la figure 21.

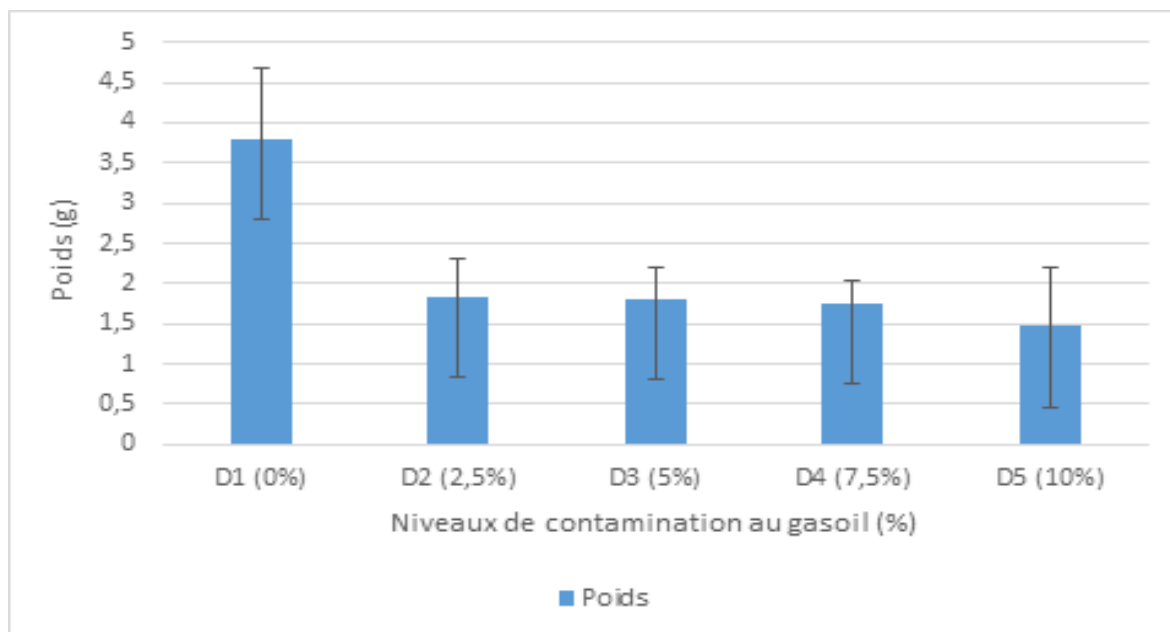


Figure 21 : Poids des racines en fonction du niveau de contamination.

La p-value est inférieur à 0,05 (0,0000), de ce fait il existe une différence significative entre les différents niveaux de contamination. La comparaison multiple des rangs moyens entre tous les groupes est représentée dans le tableau suivant.

Tableau 10 : Comparaison multiple des rangs moyens pour le poids des racines.

	D1	D2	D3	D4	D5
D1		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
D2	0,000000		1,000000	1,000000	1,000000
D3	0,000000	1,000000		1,000000	1,000000
D4	0,000000	1,000000	1,000000		1,000000
D5	0,000000	1,000000	1,000000	1,000000	

La comparaison multiple révèle des différences entre la dose 1 et toutes les autres doses.

Un test de corrélation a été réalisée afin d'évaluer les relations entre les niveaux de contamination et les paramètres mesurés (longueur des tiges et racines, poids des plantules et taux de germination). Le tableau ci-dessous présente les résultats de ce test.

Tableau 11 : Test de corrélations entre les niveaux de contamination et les paramètres de croissance des plantules.

	Dose	Longueur tige	Longueur racines	Poids	Germination
Dose	1,00000	-0,800000	-0,800000	-1,00000	-0,836660
Longueur tige	-0,80000	1,000000	0,600000	0,80000	0,597614
Longueur racines	-0,80000	0,600000	1,000000	0,80000	0,836660
Poids	-1,00000	0,800000	0,800000	1,00000	0,836660
Germination	-0,83666	0,597614	0,836660	0,83666	1,000000

Le test montre des corrélations significatives (0,05) et négatives entre les niveaux de contamination et les différents paramètres.

2. Discussion

La contamination des sols par le diesel a influencé la germination et le développement d'*Acanthus mollis*. L'effet toxique varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment la concentration du polluant, et les conditions expérimentales.

2.1. Germination

Nous avons constaté que la contamination au diesel influence la germination d'*Acanthus mollis*. Les graines ont démontré une certaine résistance à la pollution en réussissant à germer à des concentrations de 2.5% et 5%. Cependant, un retard de germination a été observé par rapport au témoin, suggérant une perturbation du processus initial. À des doses plus élevées, notamment à 10%, certaines graines n'ont pas germé et ont présenté des signes de pourriture, indiquant un effet toxique plus marqué. Cette altération du développement embryonnaire pourrait être liée à la modification des membranes cellulaires sous l'effet des hydrocarbures, compromettant ainsi l'absorption des nutriments (Aouci et Kanoun, 2020). Des études antérieures (Adam et Duncan, 2002) ont également démontré que la présence d'hydrocarbures pétroliers entraîne une baisse du taux de germination, phénomène confirmé par Dib et Sadoudi Ali Ahmed (2025). De même, (Al-Hawas et al., 2016) confirment que la présence d'HC pétroliers dans le sol affecte non seulement la germination, mais aussi la croissance et le développement des plantes.

Selon Adam et Duncan (2002), les hydrocarbures peuvent provoquer un stress physiologique chez les végétaux, perturbant les mécanismes enzymatiques liés à la germination

et au développement précoce. Holt (1987 in Khan et Shaukat, 2009), notent que le diesel a un effet inhibiteur sur la germination dans différents types de milieux. Ils soulignent que cette perturbation peut être amplifiée par les caractéristiques du sol et la teneur en contaminants. Nos résultats confirment cette tendance, indiquant que la toxicité du diesel s'accroît proportionnellement à sa concentration, ayant un effet direct sur la viabilité des graines d'*Acanthus mollis*.

L'exposition des graines au diesel pendant plus d'une semaine a significativement réduit leur capacité germinative (Amakiri et Onofeghara, 1984). L'effet de toxicité noté dans les sols pollués pourrait ne pas résulter seulement du niveau de contaminants, mais aussi des caractéristiques et de la nature du sol, du genre d'hydrocarbures, de la composition microbienne et des espèces végétales présentes (Ogbo, 2009).

2.2. Longueur de la partie aérienne

Les analyses statistiques ont mis en évidence une réduction significative de la longueur des tiges lorsque le niveau de contamination au diesel augmente. Des résultats similaires ont été rapportés par Ogbo (2009), qui a noté une réduction de la taille des tiges chez deux espèces végétales exposées à une pollution au diesel.

La longueur des tiges a été particulièrement réduite aux concentrations élevées de diesel (7,5 et 10%), tandis que les niveaux plus faibles ont entraîné une diminution bien moins marquée. Selon Chaineau et al. (2000), plus la concentration en hydrocarbures augmente, plus la taille des plantes diminue. Cela est dû à la phytotoxicité des hydrocarbures envers les plantes, qui freine durablement leur croissance. En effet leur phytotoxicité dépend de la dose, du type d'hydrocarbure et des espèces végétales (Duchaufour, 1997).

Cette diminution peut être expliquée par l'impact des hydrocarbures sur les caractéristiques physico-chimiques du sol ainsi que sur la disponibilité des éléments nutritifs. Selon Adam et Duncan (2002), la croissance des plantes peut être affectée par la modification du rapport C / N par la contamination par les hydrocarbures. Molina-Barahona et al. (2005) ont signalé que le transfert d'alcane à longue chaîne vers les parties aériennes de la plante pourrait entraîner une réduction de la longueur de la tige.

2.3. Longueur de la partie racinaire

D'après les observations statistiques réalisées, on a pu conclure que la longueur des racines d'*Acanthus mollis* diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration en hydrocarbures. À faible contamination (2.5%), la croissance reste modérément affectée, mais à des doses plus élevées (10%), on note une diminution marquée de près de 50%, signalant une perturbation physiologique. Cette diminution pourrait être due à une perturbation de l'absorption des nutriments et à une toxicité accrue du sol, mettant en péril l'ancrage et la croissance normale des racines.

Gill et al. (2004) ont rapporté que l'exposition au pétrole brut entraîne une distorsion des cellules de l'épiderme et de la corticale des racines, ce qui pourrait aggraver la dégradation de leur structure et altérer leur fonctionnement normal. De plus, Adam et Duncan (2002) ont démontré que le diesel affecte la germination des graines, ce qui peut compromettre l'établissement des racines et leur croissance ultérieure.

Par ailleurs, plusieurs études ont démontré que la pollution par les hydrocarbures provoque une diminution de la longueur des racines. Selon Norini (2007), cette diminution pourrait être associée aux caractéristiques hydrophobes des hydrocarbures qui entravent l'assimilation des nutriments et restreignent les échanges favorables entre les racines et les micro-organismes du sol.

2.4. Le poids

L'analyse des résultats relatifs au poids moyen montre que l'espèce réagit de manière similaire face à la contamination : à chaque augmentation de la dose du polluant, une diminution du poids est systématiquement observée. Selon Chaineau et al. (1997) l'effet toxique des hydrocarbures sur la partie aérienne s'exprime par un retard significatif de la croissance, cette diminution se traduit par la réduction du poids sec.

Les contaminants peuvent perturber la nutrition des plantes et limiter la croissance des racines, ce qui réduit l'absorption de l'eau et freine leur développement. L'azote joue un rôle essentiel dans la croissance végétale, mais sa disponibilité est souvent affectée par la contamination. Morot (1997) souligne que la nutrition azotée influence directement la croissance, le développement et le rendement des plantes.

Le sol, étant la principale source de nutriments, subit aussi des modifications sous l'effet de la pollution, notamment en termes d'humidité, de pH et de teneur en matière organique, ce

qui impacte la croissance végétale. Par ailleurs, l'apport d'hydrocarbures entraîne un enrichissement en carbone, entraînant une diminution des rapports C/N et C/P (Morot, 1997).



Conclusion et perspectives

La contamination des sols par les hydrocarbures, en particulier le gasoil, représente un enjeu environnemental majeur qui impacte la fertilité des sols et la croissance des plantes. L'analyse réalisée sur *Acanthus mollis* révèle l'effet de cette pollution chimique du sol sur la germination et le développement des jeunes plants, mettant en évidence une sensibilité accrue face à des niveaux élevés de polluants.

Les résultats obtenus ont permis d'évaluer la tolérance d'*Acanthus mollis* face aux différentes concentrations de gasoil et d'analyser les modifications morphologiques induites par cette contamination. Alors que la germination reste stable aux faibles doses, les concentrations élevées (7,5 % et 10 %) entraînent un ralentissement de la croissance et une réduction significative de la biomasse, mettant en évidence l'impact négatif du carburant sur le développement de cette espèce.

L'exposition aux hydrocarbures altère la croissance des plantules, provoquant une diminution significative de la longueur des tiges et des racines. Ce stress environnemental influence aussi les caractéristiques du sol, conduisant à une inhibition de la croissance et une réduction du poids.

Malgré la contamination, *Acanthus mollis* montre une capacité de germination satisfaisante, même si sa croissance est réduite à des concentrations élevées. À un taux de contamination de 10 %, quelques graines ont présenté des signes de décomposition, témoignant de la limite de leur tolérance. Cette capacité d'adaptation suggère que l'espèce pourrait prospérer dans des milieux pollués, ouvrant ainsi des voies pour des recherches sur la végétation qui résiste aux hydrocarbures.

Au terme de ce travail, il serait intéressant dans les études futures de :

- Tester *Acanthus mollis* dans des expériences de phytoremédiation afin d'évaluer son efficacité dans la décontamination des sols contaminés par les hydrocarbures.
- Réaliser un test de phytotoxicité sur une plus longue durée afin d'observer plus en détail les effets de la pollution sur la croissance.
- Mener un suivi pour le processus de germination afin de calculer le temps moyen de germination et de déduire la vitesse de germination des graines de cette espèce dans le sol témoin et pollué.
- Faire des essais in-situ pour évaluer la réponse d'*Acanthus mollis* à la pollution aux hydrocarbures.



Références bibliographiques

- **Adam G. et Duncan H. J.**, 1999. *Effect of diesel fuel on growth of selected plant species*. Environ. Geochem. Hlth. Vol. 21(4) : 353-357.
- **Adam G. et Duncan H.**, 2002. *Influence of diesel fuel on seed germination*. Environ Pollut. Vol. 120(2) : 363–370.
- **Adedokun O. et Ataga A.**, 2007. *Effects of Amendments and Bioaugmentation of Soil Polluted with Crude Oil, Automotive Gasoline Oil, and Spent Engine Oil on the Growth of Cowpea (Vigna unguiculata L. Walp)*. Scientific Research and Essay, vol. 2, pp. 147-149.
- **Ahmed Boulkis Chahrazed & Mezdaouet Khadoudja**, 2020. *Caractérisation des activités bactériennes des sols pollués aux hydrocarbures pétroliers*. Mémoire de fin d'étude, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, 2019/2020, pp. 1-120.
- **Al-Hawas, G. H. S., Shukry, W. M., Azzoz, M. M., & Al-Moaikal, R. M. S. (2012)**. *Effect of crude oil on germination, growth and seed protein profile of Jojoba (Simmondsia chinensis)*. Plant Science Journal, 1(1), 20–35.
- **Amakiri J.O. et Onofeghara F.A.**, 1984. *Effects of crude oil pollution on the germination of Zea mays and Capsicum frutescens*. Environ. Pollut. (series A) 35: 159-167.
- **Aouci Nouara & Kanoun Safia**, 2020. *Effet de la pollution du sol aux hydrocarbures sur la germination, le taux de survie et la croissance de Pistacia lentiscus L*. Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Département de Biologie. Soutenu le 29 décembre 2020.
- **Bliefert C. et Perraud R.**, 2001. *Chimie de l'environnement (Air, Eau, Sol, Déchet)*. 1ère Édition. De Boeck. 477 p.
- **Bona C., Igor M., Santos G. et Luiz Antonio**, 2011. *Effect of soil contaminated by diesel oil on the germination of seeds and the growth of Schinus terebinthifolius Raddi (Anacardiaceae) seedlings*. Vol. 56(6) : 1379-1387 p.
- **Borriss R.**, 2020. *Phyostimulation and Biocontrol by the Plant-Associated Bacillus amyloliquefaciens FZB42: An Update*. In *Phyto-Microbiome in Stress Regulation*; Springer: Singapore, Volume 1, pp. 1–20.
- **Calvet C.**, 2003. *Le Sol : Propriétés et fonctions. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces*. Tome 1, Éd. France Agricole – Dunod, 99 : 58-60.

- **Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ)**, 2015. *Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale – Études GENV222 et GENV23, Évaluation environnementale stratégique globale sur les hydrocarbures*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 41 p.
- **Chaineau C., Morel J.L., Oudot J.**, 1996. *Land treatment of oil-based drill cutting in an agricultural soil*. Journal of Environmental Quality, Vol. 25 : 858-867.
- **Chaineau C.H., Morel J.L., Oudot J.**, 1997. *Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons*. J. Environ. Qual. 26 : 1478-1483.
- **CISS P.**, 2003. *Étude de l'utilisation du diesel oil dans les moteurs diesel turbocompresseur aux ICS plate-forme Darou*. Mémoire de fin d'études, École Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, pp. 15.
- **Coliín F.**, 2000. *Pollution localisée des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés*. Édition TEC ET DOC, 417 p.
- **Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Bellenfant G., Beranger S., Hube D., Blanc C., Zornig C., Girardeau I.**, 2000. *Quelles techniques pour quels traitements, analyse coût bénéfices*. Rapport final BRGM1RP-58609-FR, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), 403 p.
- **Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Bellenfant G., Cristaldi A., Oliveri C.G., Cosentino S.L., Mauromicale G., Copat C., Grasso A., Zuccarello P., Fiore M., Restuccia C., Ferrante M.**, 2020. *Phytoremediation potential of Arundo donax (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals*. Environ. Res, 185 p.
- **Colombano S., Saada A., Victoire E., Guerin V., Zornig C., Amalric L., Blessing M., Widory D., Hube D., Blanc C.**, *Nature des produits pétroliers et origine du vieillissement*. BRGM, 141 p.
- **Cristaldi, A., Copat, C., Oliveri Conti, G., Zuccarello, P., Grasso, A., & Ferrante, M. (2020)**. *Phytoremediation*. In C. M. Hussain (Ed.), *The Handbook of Environmental Remediation: Classic and Modern Techniques* (pp. 268–298). Royal Society of Chemistry.
- **Dib, D., & Sadoudi Ali Ahmed, D. (2019)**. Influence of diesel fuel contamination on *Xanthium strumarium* L. germination and growth. International Journal of Phytoremediation, 22(3), 236–240. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1658705>

- **Dib, D., & Sadoudi Ali Ahmed, D. (2024).** Comparative study of the diesel fuel contamination effects of different types of soils on the growth and germination of four plant species. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 67, e24230728. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2024230728>
- **Duchaufour P.,** 2001. *Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement*. 6ème édition, MASSON, Paris Milan Barcelone, 498 p.
- **Favas P.J.C., Pratas J., Varun M., D'Souza R., Paul M.S.,** 2014. *Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: Potential of native flora*.
- **Fréjaville R.M.,** 2009. *Le corpus en analyse terminologique de domaines composites et interdisciplinaires*. *Passeurs de mots, passeurs d'espoir*, p. 593-604.
- **Gill L.S., Nyawuame H.G.K., Ehikhametator A.D.,** 2004. *Effect of crude oil on the growth and anatomical features of Chromolaena odorata (L.) K. and R.* Centre for Biol. Information Technology, Univ. Queensland, Australia. ABN: 639 429 1.
- **Guillet J.-P.,** 2000. *Chimie des hydrocarbures*. Dunod, pp. 45-70.
- **Hadjine, S., & Kadri, M. (2020).** *Effet de la pollution du sol par les hydrocarbures sur la germination et la croissance de quelques espèces végétales*. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Département de Biologie. 76 pages. Disponible sur le dépôt institutionnel de l'UMMTO.
- **Hateb A., Mbengue M., Noubatare N., Faye S., Niang Y.,** 2012. *Pollution du sol par les pesticides et les engrais.*, 19 p.
- **Havugimana E., Bhople B.S., Kumar A., Byiringiro E., Mugabo J.P., Kumar A.,** 2017. *Soil pollution – major sources and types of soil pollutants*. Environmental.
- **Henner P., Schiavon M., Druelle V., Lichtfouse E.,** 1999. *Phytotoxicity of ancient gaswork soils. Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on plant germination*. *Organic Geochemistry*, 30 : 963-969.
- **Holt (1987 in Khan et Shaukat, 2009).** *Effets du diesel sur la germination des plantes*.
- **Jara C., Leyton M., Osorio M., Silva V., Fleming F., Marilyn P., Madrid A., Mellado M.,** 2017. *Antioxidant, phenolic and antifungal profiles of Acanthus mollis (Acanthaceae)*. *Natural Product Research*, 31(1) : 1–4.
- **Jean-Pierre Wauquier,** 1998. *Raffinage du pétrole (Le). Tome 1. Pétrole brut. Produits pétroliers. Schémas de fabrication*. Technip, p. 22.

- **Jumeau S.**, 1999. *Devenir de la contamination en hydrocarbures lors de la mise en dépôt des produits de dragage*. Rapport de DEA Sciences et Techniques de l'Environnement, Université Paris XII-Val de Marne.
- **Kaushal J., Bhasin S.K., Bhardwaj P.**, 2015. *Phytoremediation: A Review Focusing on Phytoremediation Mechanisms*. International Journal of Research in Chemistry and Environment, 5(3) : 1–9.
- **Koller E.**, 2004. *Traitement des pollutions industrielles (eau, air, déchet, sol, boues)*. Édition DUNOD, Paris, 424 p.
- **Koshlaf, E., & Ball, A. S. (2017)**. *Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments*. AIMS Microbiology, 3(1), 25–49.
- **Lefebvre G.**, 1978. *Chimie des hydrocarbures*. Édition TECHNIP, Paris, 424 p.
- **Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger P.H.**, 2001. *Guide sur le comportement des pollutions dans les sols et les nappes*. BRGM/RP-50662-FR.
- **Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger P., Darmendrail D., Conil P.**, 2001. *Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes*. BRGM, 73 p.
- **Leyval C. et Binet P.**, 1998. *Effect of Polyaromatic Hydrocarbons (PAHs) and Arbuscular Mycorrhizal Colonization of Plants*. Journal of Environmental Quality, Vol. 27, pp. 402-407.
- **Matos P., Figueirinha A., Paranhos A., Nunes F., Cruz P., Geraldés C.F.G.C., Cruz M.T., Batista M.T.**, 2018. *Bioactivity of Acanthus mollis: Contribution of benzoxazinoids and phenylpropanoids*. Journal of Ethnopharmacology, Vol. 227, pp. 198–205.
- **Molina Barahona L., Vega Loyo L., Guerrero M., Ramirez S., Romero I., Vega Jarquin C., Albores A.**, 2005. *Ecotoxicological evaluation of diesel-contaminated soil before and after a bioremediation process*. Environmental Toxicology, Vol. 20(1), pp. 100–109.
- **Morgan P., Watkinson R.J.**, 1994. *Biodegradation of components of petroleum*. Biochemistry of Microbial Degradation, Vol. 2(1), pp. 1-31.
- **Mortet A.**, 2019. *Étude du rôle de quelques plantes graminées et légumineuses dans la phytoremédiation des sols pollués par les hydrocarbures*. Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ben Badis Mostaganem, 177 p.

- **Njoku K., Akinola O., Oboh B.O.**, 2009. *Phytoremediation of crude oil contaminated soil*. Édition Marsland Press, p. 85.
- **Norini M.-P.**, 2007. *Écodynamique des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des communautés microbiennes dans des sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique : influence de la rhizosphère et de la mycorrhization*. Thèse de doctorat.
- **Ogbo E.M.**, 2009. *Effects of diesel fuel contamination on seed germination of four crop plants: Arachis hypogaea, Vigna unguiculata, Sorghum bicolor and Zea mays*. African Journal of Biotechnology, Vol. 8(2), pp. 250-253.
- **Park S., Kim K.S., Kim J.T., Kang D., Sung K.E.**, 2011. *Effects of humic acid on phytodegradation of petroleum hydrocarbons in soil simultaneously contaminated with heavy metals*. Journal of Environmental Science, pp. 2034–2041.
- **Pascal Martial Fokou Mbogne**, 2017. *Biorémédiation augmentée de sols contaminés aux hydrocarbures lourds par ajout de substrats organiques*. École de technologie supérieure, Université du Québec.
- **Pivetz B.E.**, 2001. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Groundwater at Hazardous Waste Sites*. Ground Water Issue, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development and Office of Soil Waste and Emergency, pp. 15-18.
- **Rajajayavel S.R.C., Ghoshal S.**, 2015. *Enhanced reductive dechlorination of trichloroethylene by sulfidated nanoscale zerovalent iron*. Water Research, Vol. 78, pp. 144-153.
- **Ramade F.**, 1992. *Précis d'écotoxicologie*. Édition Masson, Paris, 300 p.
- **Reeves R.D.**, 2006. *Hyperaccumulation of trace elements by plants*. In: Morel, Chavarria G., Goncharova N. (Eds.), *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils*. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, Vol. 68, Springer, New York, pp. 590-600.
- **Shirdam, R., Daryabeigi Zand, A., Nabi Bidhendi, G. R., & Mehrdadi, N.** (2008). *Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils with emphasis on the effect of petroleum hydrocarbons on the growth of plant species*. **Phytoprotection**, 89(1), 21–29.

- **Sidhu G.P.S., Bali A.S., Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K.**, 2018. *Ethylenediamine disuccinic acid enhanced phytoextraction of nickel from contaminated soils using *Coronopus didymus* (L.) Sm.* Chemosphere, pp. 234–243.
- **Speight J.G.**, 2014. *The Chemistry and Technology of Petroleum*. Fifth Edition, CRC Press, États-Unis, 984 p.
- **Su Y., Cheng Y., Shih Y.**, 2013. *Removal of trichloroethylene by zerovalent iron/activated carbon derived from agricultural wastes*. Journal of Environmental Management, Vol. 129, pp. 361-366.
- **SOLTANI M.**, 2004. *Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre souches Gram négatif hydrocarbonoclastes, variation en fonction de la source de carbone*. Thèse de doctorat de l'université de Paris. 284p.
- **Tang J., Wang M., Wang F., Sun Q., Zhou Q.**, 2011. *Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil*. Journal of Environmental Science, Vol. 23(5), pp. 845-851.
- **Tissot B.P., Welte D.H.**, 1984. *Petroleum formation and occurrence*. Springer, Berlin, pp. 1-13.
- **Weisman W.H.**, 1998. *Total petroleum hydrocarbon criteria working group Series Vol. 1: Analysis of petroleum hydrocarbons in environmental media*. Amherst Scientific Publishers, Massachusetts, p. 23.
- **Yuniati M.D.**, 2018. *Bioremediation of petroleum-contaminated soil: A Review*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 118(012063), pp. 1755-1315.

Site internet

- <https://www.tela-botanica.org/bdtfx-nn-74930>
- <https://www.ofb.gouv.fr/eviter-lutilisation-de-tourbe-en-jardinage>

Résumé

Cette étude a été réalisée pour examiner l'influence de la pollution par le diesel sur la germination et la croissance d'*Acanthus mollis*. Nous avons utilisé un terreau à base de tourbe comme substrat. Cinq niveaux de pollution ont été testés (0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %) pour évaluer la tolérance de l'espèce face aux hydrocarbures. Les résultats montrent que malgré un retard de germination observé par rapport au témoin, les graines ont réussi à germer à toutes les concentrations. Cependant, à 10 % de contamination, une pourriture partielle a été enregistrée. La croissance des tiges et des racines diminue progressivement avec l'augmentation du taux de contamination, entraînant également une réduction du poids des plantules. Ces observations suggèrent qu'*Acanthus mollis* possède une certaine résistance aux hydrocarbures, bien que son développement soit compromis à des niveaux de pollution élevés. Cette capacité de tolérance ouvre des perspectives pour l'étude des mécanismes d'adaptation et les stratégies possibles de dépollution des sols contaminés.

Mots clés : *Acanthus mollis*, germination, croissance, contamination, diesel.

Abstract

This study was conducted to examine the influence of diesel pollution on the germination and growth of *Acanthus mollis*. We used peat-based potting soil as the substrate. Five levels of pollution were tested (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%) to assess the species' tolerance to hydrocarbons. The results show that despite a delay in germination compared to the control, the seeds managed to germinate at all concentrations. However, at 10% contamination, partial rot was recorded. Stem and root growth gradually decreased with increasing contamination levels, also leading to a reduction in seedling weight. These observations suggest that *Acanthus mollis* has a certain resistance to hydrocarbons, although its development is compromised at high levels of pollution. This tolerance capacity opens up prospects for the study of adaptation mechanisms and possible strategies for decontaminating polluted soils.

Keywords: *Acanthus mollis*, germination, growth, contamination, diesel.