MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Laboratoire de Production, Sauvegarde des Espèces Menacées et des Récoltes. Influence des variations climatiques.

THESE

DE DOCTORAT

Spécialité : Ecologie Animale et Environnement

Option : Protection de l'environnement

Présentée

par DIB Djaffer

Impact de la pollution du sol aux hydrocarbures sur la flore et la pédofaune dans quelques stations-services de la Wilaya de Tizi-Ouzou

Membres du jury :

Nom et Prénom	Grade	Lieu d'Exercice	Qualité
DERRIDJ Arezki	Professeur	UMMTO	Président
HANNACHI Lynda	MCA	UMMTO	Rapporteur
SADOUDI-ALI AHMED Djamila	Professeur	UMMTO	Co-Rapporteur
LARDJANE-AIT SLIMANE Nadia	MCA	UMMTO	Examinatrice
CHERGUI Abdelmalek	Professeur	Ecole Polytechnique (Alger)	Examinateur
LARIBI Hassiba	Professeur	U. Blida	Examinatrice

Soutenue le 28 Janvier 2021

Remerciements

Je remercie Mme HANNACHI Lynda, MCA à l'UMMTO, directrice de thèse, qui m'a permis de faire cette thèse sous sa direction et pour la confiance et tout le temps qu'elle a sue m'accorder. J'ai eu la chance de bénéficier de ses nombreux conseils, de sa grande expérience et de tout son soutien durant la réalisation de tout ce travail.

Je remercie Mme SADOUDI Ali-Ahmed Djamila, Professeur à l'UMMTO, co-directrice de la thèse, pour la confiance qu'elle a sue m'accorder, pour tous ses précieux conseils, sa disponibilité, son soutien et ses encouragements. J'ai eu la chance de bénéficier et de profiter de sa grande expérience durant toute la durée de ce travail.

Je remercie Mr DERRIDJ Arezki, Professeur à l'UMMTO, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Qu'il trouve ici mes sincères et chaleureux remerciements.

Je remercie également Mme LARDJANE-AIT SLIMANE Nadia, MCA à l'UMMTO ; Mr CHERGUI Abdelmalek, Professeur à l' École Polytechnique (Alger) et Mme LARIBI Hassiba, Professeur à l'Université de Blida, pour avoir accepté de participer au jury de cette thèse. C'est pour moi un grand honneur que de présenter ce travail devant vous.

Enfin, je remercie tous ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, de par leurs connaissances, leur soutien ou leur encouragement (étudiants, doctorants, enseignants, amies et famille).

Résumé

L'étude du réseau de distribution de carburant à Tizi-Ouzou a permis de répertorier l'ensemble des stations-services, qui sont des sources potentielles de pollution par les hydrocarbures. Nous avons analysé les données recueillies et réalisé des cartes de la distribution de ces stations-services.

Dans le but d'étudier les effets des rejets des stations-services sur la végétation et les communautés d'invertébrés du sol, nous avons sélectionné trois sites à proximité de deux stations-service. La végétation et les invertébrés du sol ont été inventorié au niveau des sites.

Les résultats ont montré une influence des rejets des stations-services sur les propriétés du sol (TPH, N, C, pH et humidité). Les espèces végétales et les communautés d'invertébrés étaient aussi influencées à travers l'abondance, la diversité biologique (H') et l'équitabilité (J). La richesse en espèces de la végétation a particulièrement été affectée dans les zones les plus contaminées. Certaines espèces comme *Xanthium strumarium, Avena sp, Conium maculatum* et *Oxalis pes-caprae* ont pu s'établir dans les zones contaminées.

Les zones moyennement contaminées ont favorisé l'abondance de certains ordres d'invertébrés. Les Isopoda et Stylommatophora, étaient principalement présents dans les zones contaminées. En revanche, les Hymenoptera, les Collembolla, les Parasitiformes et les Coleoptera ont été pénalisés par les fortes contaminations et semblent avoir été favorisés par les contaminations moins importantes.

Les résultats des essais menés au laboratoire sur les effets du gasoil sur le *Xanthium strumarium* ont mis en évidence que la germination et la longueur de tige ont été significativement réduites dans les niveaux les plus élevés. En revanche, la longueur des racines a été influencée positivement par la contamination. En effet nous avons obtenu une longueur de racine de 19,92cm à 5g de diesel par 100g de substrat, contre une racine de 12,89cm au niveau du témoin.

Le second test de phytotoxicité implique *Avena sativa, Daucus carota, Cerinthe major et Xanthium strumarium*, cette dernière s'est distinguée comme l'espèce la moins inhibée par les contaminations appliquées aux sols et comme celle qui s'adapte le mieux aux changements de substrats. Par conséquent, nous pensons que *X. strumarium* pourrait être un candidat potentiel pour la phytoremédiation des sites contaminés par le carburant diesel.

Mots clés : Hydrocarbures, invertébrés, végétation, stations-services, phytotoxicité, *X. strumarium*

Abstract

The study of the fuel distribution network in Tizi-Ouzou has made it possible to identify all the gas stations, which are potential sources of oil pollution. We analyzed the data collected and produced maps of the distribution of these gas stations.

In order to study the effects of gas stations rejects on the vegetation and the soil invertebrate communities, we selected three sites near two gas stations. Vegetation and soil invertebrates were inventoried in the sites.

The results showed an influence of gas stations rejects on the soil properties (TPH, N, C, pH and moisture). Plant species and invertebrate communities were also influenced through the abundance, biological diversity (H') and equitability (J). Species richness of vegetation was particularly affected in the most contaminated areas. Some species as *Xanthium strumarium, Avena sp, Conium maculatum* and *Oxalis pes-caprae* were able to establish in the contaminated zones.

Moderately contaminated areas have favored the abundance of certain orders of invertebrates. Isopoda and Stylommatophora were mainly present in the contaminated areas. On the other hand, the Hymenoptera, the Collembolla, the Parasitiformes and the Coleoptera were penalized by the strong contaminations and seem to have been favored by the less significant contaminations.

The results of laboratory tests on the effects of diesel fuel on *Xanthium strumarium* have shown that germination and the length of the stems were significantly reduced in the highest contamination levels. On the other hand, the length of the roots was positively influenced by the contamination. Indeed, we obtained a root length of 19.92cm at 5g of diesel per 100g of substrate, against a root of 12.89cm at the control.

The second phytotoxicity test involved *Avena sativa, Daucus carota*, *Cerinthe major* and *Xanthium strumarium*, the latter was the less inhibited species by the contamination applied to the soils and the one with the best adaptations to the substrates changes. Therefore, we think that *X. strumarium* could be a potential candidate for the phytoremediation of sites contaminated by diesel fuel.

Key words: Hydrocarbons, invertebrates, vegetation, gas stations, phytotoxicity, *X. strumarium*

Liste des figures

Figure 1. Composantes principales du sol (White, 2005) 9
Figure 2. Schéma d'une tour de distillation utilisée pour le raffinage du pétrole (Pichtel, 2007)..... 12
Figure 3. Configuration générale d'une station-service d'une aire d'autoroute (Patej, 2002) 14
Figure 4. Test de phytotoxicité d'une terre polluée par des solvants chlorés (Colin et al., 2000)..... 20
Figure 5. Photo montrant une expérience de phytotoxicité par du pétrole brut, impliquant une espèce végétale (Cyperus brevifolius) (Baruah et al., 2014)..... 20
Figure 6. Variation de la structure de la végétation à travers 2 transects dans le site d'une ancienne cokerie (Dazy et al., 2009) 21
Figure 7. Germination totale de quelques espèces à différents niveaux de contamination par du carburant diesel (Luhach et Chaudhry, 2012) 22
Figure 8. Coupe transversale d'une feuille de Cyperus brevifolius montrant les différentes structures des tissues dans un échantillon témoin (0 ppm) (Baruah et al., 2014) 24
Figure 9. Coupe transversale d'une feuille de Cyperus brevifolius montrant les différentes structures des tissus dans un échantillon contaminé (50 000 ppm) (Baruah et al., 2014)..... 24
Figure 10. Plantules de Schinus terebinthifolius, poussant dans un sol contaminé par du carburant diesel (Bona et al., 2011)..... 25
Figure 11. Longueur de la plumule de quatre plantes cultivées en réponse à différents niveaux (%) de contamination par le diesel (Luhach et Chaudhry, 2012)..... 26
Figure 12. Effets inhibiteurs de sols contaminés par des huiles usagées sur le taux de germination, la hauteur de la plantule et la biomasse aérienne de quelques espèces végétales (Sharifi et al., 2007)..... 26
Figure 13. Découpage administratif de la wilaya de Tizi-Ouzou avec localisation des zones d'étude (Originale, 2019) 33
Figure 14. Vue globale du premier site d'étude avec son entourage (Original, 2019)..... 35
Figure 15. Vue globale des sites d'études 2 et 3 avec leur entourage (Original, 2019) 39
Figure 16. Plan expérimental au niveau du site d'étude 01..... 43
Figure 17. Plan expérimental au niveau du site d'étude 02..... 44
Figure 18. Plan expérimental au niveau du site d'étude 03..... 44
Figure 19. Triangle des textures (USDA, 2019)..... 45
Figure 20. Echantillonnage de la faune du sol par les pots Barber 50

Figure 21. Echantillonnage de la faune du sol par extraction du sol..... 50
Figure 22. Essai de phytotoxicité du diesel sur X. strumarium..... 52
Figure 23. Individu de Xanthium strumarium (Original, 2018)..... 53
Figure 24. Individus d'Avena sativa (Sendelbach, 2005) 54
Figure 25. Individu de Daucus carota (Povey, 2007)..... 55
Figure 26. Individu de Cerinthe major (Bernier, 2006)..... 55
Figure 27. Essais de phytotoxicité du diesel sur les différentes espèces végétales..... 58
Figure 28. Répartitions des stations-service à Tizi-Ouzou selon leur nature..... 60
Figure 29. Répartition des capacités de stockage par type de station à Tizi-Ouzou 62
Figure 30. Répartition des capacités de stockage par type de carburant dans les stations-services de Tizi-Ouzou..... 63
Figure 31. Consommation annuelle (%) par type de carburant au niveau des stations-service à gestion direct de Tizi-Ouzou..... 64
Figure 32. Semis de points des stations-service de Tizi-Ouzou..... 66
Figure 33. Centre moyen et distance de standard des stations-service de Tizi-Ouzou 66
Figure 34. Ellipse standard des stations-service de Tizi-Ouzou..... 67
Figure 35. Polygones de Thiessen des stations-service de Tizi-Ouzou..... 67
Figure 36. Polygones de Thiessen des stations-service à gestion direct de Tizi-Ouzou 68
Figure 37. Polygones de Thiessen des stations-service privés de Tizi-Ouzou..... 68
Figure 38. Valeurs du coefficient de Sorensen–Dice (DSC) pour l'échantillonnage de la végétation des trois sites (Transects 1 et 2)..... 72
Figure 39. Germination cumulée de X. strumarium à différents niveaux de contamination par le diesel..... 79
Figure 40. Graphe de corrélation avec les histogrammes des variables (nivaux de contamination, pourcentage de germination, longueur de tige et longueur racinaire) 80
Figure 41. Taux de germination de X. strumarium 82
Figure 42. Taux de germination de A. sativa 82
Figure 43. Taux de germination de D. carota..... 83
Figure 44. Taux de germination de C. major..... 84

Liste des tableaux

Tableau 1. Variations de la richesse en espèce (S), de l'indice de Shannon-Weaver (H') et de l'équitabilité (J) à travers 2 transects dans le site d'une ancienne cokerie (Dazy et al., 2009) 21
Tableau 2. Espèces avec une capacité de phytoremédiation des hydrocarbures pétroliers démontrée (Frick et al., 1999) 28
Tableau 3. Espèces avec une capacité de tolérance des hydrocarbures pétroliers démontrée (Frick et al., 1999) 29
Tableau 4. Composition du terreau universel 56
Tableau 5. Capacités de stockage des carburants au niveau des stations-service à Tizi-Ouzou 62
Tableau 6. Quantités annuelles distribuées au niveau des stations-service à gestion direct de Tizi-Ouzou (M^3) 63
Tableau 7. Répartition du nombre de stations-services et des communes selon le nombre d'habitants 65
Tableau 8. Propriétés physico-chimiques des sols de chaque transect (T1 et T2) des trois sites d'échantillonnage 69
Tableau 9. Analyses des TPH (qualitatifs et quantitatifs) des sols de chaque transect (T1 et T2) des trois sites d'échantillonnage 70
Tableau 10. Coefficients de corrélation entre les propriétés physico-chimiques du sol et les indices écologiques 71
Tableau 11. Abondances des ordres d'invertébrés dans chaque zone de chaque transect (méthode des pots Barber, Août) 74
Tableau 12. Abondances des ordres d'invertébrés dans chaque zone de chaque transect (méthode des pots Barber, Mai) 74
Tableau 13. Abondances des ordres d'invertébrés dans chaque zone de chaque transect (méthode d'extraction) 75
Tableau 14. Abondance totale (N), nombre d'ordres (NO), diversité de Shannon-Weaver (H'), et équitabilité de Pielou (J) dans chaque zone de chaque transect pour la méthode des pots Barber en Août 76
Tableau 15. Abondance totale (N), nombre d'ordres (NO), diversité de Shannon-Weaver (H'), et équitabilité de Pielou (J) dans chaque zone de chaque transect pour la méthode des pots Barber en Mai 77

Tableau 16. Abondance totale (N), nombre d'ordres (NO), diversité de Shannon-Weaver (H'), et équitabilité de Pielou (J) dans chaque zone de chaque transect pour la méthode d'extraction..... 77
Tableau 17. Pourcentage de germination des grains, la longueur racinaire, la longueur des tiges, et le coefficient de vélocité de germination de X. strumarium à différents niveaux de contamination par le diesel 14 jours après la semence..... 78
Tableau 18. Coefficients de corrélation entre les niveaux de contamination, le pourcentage de germination, la longueur racinaire et la longueur de tige..... 80
Tableau 19. Taux de germination des différentes espèces dans chaque substrat..... 81
Tableau 20. Résultats des différents paramètres de croissance pour X. strumarium..... 85
Tableau 21. Résultats des différents paramètres de croissance pour A. sativa..... 86
Tableau 22. Résultats des différents paramètres de croissance pour D. carota..... 87
Tableau 23. Résultats des différents paramètres de croissance pour C. major..... 88
Tableau 24. Effets des HAP sur la longueur racinaire de quelques espèces (Maliszewska-Kordybach et Smreczak, 2000) comparé à nos résultats..... 100

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE 13

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 5

1. Synthèse des travaux effectués par rapport à la thématique 6

1.1. En Algérie et en Méditerranée 6

1.1.1. Pollution des sols 6

1.1.2. Pollution sur les côtes de la Méditerranée 7

1.1.3. Pollution de l'air 7

1.2. Dans le monde 7

1.2.1. Les effets sur les organismes vivants 7

1.2.2. Dépollution des sols contaminés 8

2. Le sol 9

2.1. Constitution du sol 9

2.2. Les plantes et le sol 10

2.3. La faune du sol 10

3. Pollution du sol par les hydrocarbures **10**

3.1. Définition du sol pollué 10

3.2. Hydrocarbures 11

3.3. Comportement des hydrocarbures dans le sol 12

4. Les stations-services **13**

4.1. Présentation d'un plan type de stations-services 13

4.2. Gestion des aspects environnementaux dans une station-service 14

4.3. Rejets dans l'environnement 15

4.4. Impacts sur l'environnement 16

4.4.1. Air et santé 16

4.4.2. Eaux 17

4.4.3. Sol 18

4.4.4. Végétation et faune 19
CHAPITRE II : DESCRIPTION DES SITES D'ETUDE 32
1. Présentation de la wilaya de Tizi-Ouzou **33**
2. Choix des zones d'études pour l'inventaire **33**
3. Résultats des visites sur site effectuées au niveau des stations-services **34**
4. Description des zones d'études retenues **34**
4.1. Station-service d'Idjeur 34
4.1.1. Description de la commune 36
4.1.2. Description de l'environnement immédiat de la station 36
4.2. Station-service de Fréha 37
4.2.1. Présentation de la commune de Fréha 37
4.2.2. Description de l'environnement immédiat de la station 38
CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES 40
1. Etude du réseau de distribution de carburant au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou **41**
1.1. Récolte des données 41
1.2. Analyse du secteur de distribution des produits pétroliers à Tizi-Ouzou 41
1.3. Analyse spatiale 41
1.3.1. Le centre moyen avec la distance de Bachi 42
1.3.2. Ellipse standard 42
1.3.3. Polygone de Thiessen 42
2. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la végétation **43**
2.1. Plan expérimental 43
2.2. Analyses physico-chimiques du sol 45
2.2.1. Granulométrie 45
2.3. Echantillonnage de la végétation 47
2.4. Analyse des données 48
3. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la faune **49**

3.1. Méthodes d'échantillonnage 49
3.1.1. Méthode de piégeage par Pots Barber 49
3.1.2. Extraction du sol 49
3.2. Exploitation et analyse des données 49
4. Essais de phytotoxicité au niveau du laboratoire **51**
4.1. Premier essai de phytotoxicité 51
4.1.1. Espèce étudiée 51
4.1.2. Substrat utilisé 51
4.1.3. Plan expérimental 51
4.1.4. Suivi de l'expérience 52
4.2. Deuxième test de phytotoxicité 53
4.2.1. Présentation des espèces végétales utilisées 53
4.2.2. Présentation des substrats utilisés 56
4.2.3. Composition des substrats utilisés 57
4.2.4. Contamination des substrats 57
4.2.5. Semis 57
4.2.6. Suivi de l'expérience 58
4.3. Analyses statistiques 58
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION 59
Résultats 60
1. Etude du réseau de distribution de carburant au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou **60**
1.1. Analyse du secteur de distribution des produits pétroliers à Tizi-Ouzou 60
1.1.1. Profil du réseau de distribution des produits pétroliers de Naftal à Tizi-Ouou.. 60
1.1.2. Stockage des carburants 61
1.1.3. Analyse des quantités de carburants distribuées au niveau de Tizi-Ouzou 63
1.2. Analyse spatiale 64
2. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la végétation **69**

2.1. Analyses physico-chimiques des sols 69
2.2. Inventaire de la végétation et indices écologiques 71
3. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la faune **74**
4. Essais de phytotoxicité sur quelques espèces végétales **78**
4.1. Premier essai de phytotoxicité 78
4.1.1. Germination 78
4.1.2. Longueur racinaire 79
4.1.4. Test de corrélation 80
4.2. Deuxième essai de phytotoxicité (étude comparative) 81
4.2.1. Germination 81
4.2.2. Croissance 84
Discussion 90
1. Etude du réseau de distribution de carburant au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou **90**
2. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la végétation **92**
3. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la faune **95**
4. Essais de phytotoxicité sur quelques espèces végétales **98**
4.1. Premier essai de phytotoxicité 98
4.2. Deuxième essai de phytotoxicité (étude comparative) 101
CONCLUSION GENERALE 103
Références bibliographiques 108
Annexes 126

INTRODUCTION GENERALE

La contamination des milieux naturels par les produits pétroliers (composés en partie par des hydrocarbures toxiques pour les organismes vivants) est un problème environnemental sérieux remettant en question nos modes de production actuels et notre manière d'exploiter les ressources naturelles. Ce genre de contamination environnementale est relativement courant en raison de l'utilisation généralisée des produits pétroliers (Abha et Singh, 2012).

Les produits chimiques organiques sont la base de nombreuses industries comme le raffinage du pétrole. L'utilisation de ces produits a augmenté dans le monde entier depuis la Seconde Guerre mondiale et les accidents sont en augmentation préoccupante. Ces produits représentés par l'essence, le diesel ou encore les huiles moteurs, contaminent les sols et les eaux en raison d'utilisations ou de stockages inadéquats, d'accident ou encore de déversements intentionnels, lors du transport du pétrole notamment (pipelines, navires, camions) (Pichtel, 2007).

La consommation mondiale en énergie ne cesse d'augmenter, les énergies fossiles étant, aujourd'hui les plus utilisées dans le monde (plus de 75%). Les pays asiatiques non membres de l'OCDE, à leur tête la chine, comptant pour plus de la moitié de cette augmentation (U.S. Energy Information Administration, 2016). Ce contexte fait en sorte qu'il y ait de plus en plus de produits pétroliers qui seront mis en jeu, une situation propice à diverses formes de pollution.

Dans cette conjoncture mondiale, l'Algérie se positionne comme le dix-septième plus grand producteur de pétrole au monde, et l'un des trois principaux en Afrique (U.S. Energy Information Administration, 2019). C'est aussi le premier producteur de gaz naturel à l'échelle Africaine et le deuxième plus grand fournisseur de gaz naturel pour l'Europe (U.S. Energy Information Administration, 2016). Sa consommation d'énergie est basée principalement sur les énergies fossiles et ses exportations sont dominées par les hydrocarbures, avec plus de 90% du total des exportations pour l'année 2018 (Direction générale des douanes, 2018). Tous ces facteurs font qu'il y a d'importantes quantités de pétrole qui sont extraites, transformées, transportées, distribuées et utilisées sur tout le territoire algérien, une situation représentant des sources potentielles de pollutions des milieux naturels.

Le pétrole peut générer divers types de contaminations (accidentelles ou intentionnelles), de par son extraction à partir du sous-sol, son raffinage dans les unités industrielles, son transport par divers moyens (pipelines, navires, camions), et bien sûr ses diverses utilisations (industrielles et domestiques).

Les produits pétroliers sont des mélanges composés principalement d'hydrocarbures (Henry, 1998). Après un déversement dans le milieu naturel, certains de ces hydrocarbures se montrent persistants alors que d'autres sont considérablement réduits au fil du temps par de nombreux processus (Rhbal *et al.*, 2010), parmi lesquels la biodégradation, qui dépend de nombreux facteurs (Solano-Serena *et al.*, 2001).

Les hydrocarbures peuvent avoir des effets toxiques sur les espèces végétales et les organismes vivants du sol lorsque le milieu atteint un niveau élevé de concentration (Tang *et al.*, 2011). Ces effets peuvent être localisés à diverses échelles. Aux niveaux anatomique et physiologique, avec, par exemple, des effets de déformation des structures des tissus des plantes et la diminution des taux de chlorophylle (Gillian Adam et Duncan, 2003 ; Baruah *et al.*, 2014). Au niveau morphologique, il a été observé lors de plusieurs études, des effets inhibiteurs sur la germination et la croissance des plantes, avec diminution du taux de germination, retard de la germination, diminution des longueurs de la tige et de la racine (Luhach et Chaudhry, 2012 ; Ogbo, 2009). Au niveau des communautés, il a été observé, autant sur des communautés végétales, que sur celles d'invertébrés du sol, une différenciation des communautés vivant sur des sols contaminés par les produits pétroliers et celles vivant sur des sols non contaminés (Dazy *et al.*, 2009 ; Erstfeld et Snow-Ashbrook, 1999).

L'une des installations susceptibles de générer des contaminations par les produits pétroliers est la station-service. Cette dernière permet de fournir divers services, principalement la distribution des carburants, et autres prestations, tels que le lavage, le graissage, la vente d'accessoires et produits pour véhicules (Hiegel, 1999). Certaines activités se déroulant dans le cadre de l'exploitation d'une station-service peuvent être à l'origine d'impacts environnementaux, tels la dégradation de la qualité de l'eau et du sol (déversement d'hydrocarbures), de l'atmosphère (émanations de composés organiques volatils notamment) ou peuvent contribuer à la dégradation de la qualité de vie de l'entourage par l'émission d'odeurs d'hydrocarbures, de produits de lavage et divers bruits (Administration de l'environnement du Luxembourg, 2014).

En Algérie, les stations-services ne cessent d'augmenter en raison de l'augmentation du parc automobile et la mise en service des nouvelles autoroutes (autoroute Est-Ouest) (Naftal, 2019). Cependant, ces stations-services ne respectent pas toujours la règlementation environnementale et rejettent leurs effluents dans les milieux naturels sans traitement préalable (Nemer, 2015). Il

apparaît donc logique de procéder à une étude qui s'intéresserait aux impacts de ces rejets sur le sol et sur les communautés végétales et animales de ce dernier.

La contamination des sols par des produits pétroliers peut nécessiter une décontamination dans le cas où la quantité de polluant impliqué est trop importante pour que les processus naturels puissent la gérer. Cette décontamination peut se faire, soit d'une manière conventionnelle (méthodes physiques et chimiques), soit par les méthodes de bioremédiation qui sont moins couteuses (Dudai *et al.,* 2018). Dans le but de développer les techniques alternatives et respectueuses de l'environnement tel que la phytoremédiation, il est nécessaire d'identifier et d'étudier les espèces tolérantes aux hydrocarbures, capables de se développer dans des milieux contaminés. De ce fait, une étude à proximité de stations-services, pourrait mettre en évidence certaines espèces tolérantes à la contamination par les produits pétroliers.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les différentes recherches entreprises dans le cadre de cette thèse. Les objectifs fixés consistent :

- À mener une étude préliminaire du réseau de distribution des carburants dans la wilaya de Tizi-Ouzou. Cette étude fournira plusieurs données intéressantes : une carte de la distribution de stations-services (privées et étatiques) et des analyses spatiales de la répartition de ces stations. Ce qui constitue une première étape dans l'identification des sources potentielles de pollution par les hydrocarbures dans la région ;
- À effectuer une prospection de plusieurs stations dans la région, afin de sélectionner celles présentant un intérêt pour l'étude : à savoir, une contamination du sol due aux rejets des stations et la présence de végétation dans le site contaminé ;
- À réaliser l'inventaire de la végétation et des invertébrés du sol ainsi qu'une étude physico-chimique de ce dernier sur les sites d'étude. Des espèces potentiellement tolérantes aux hydrocarbures seront particulièrement recherchées ;
- La dernière partie consiste à tester au laboratoire, les effets du diesel (carburant le plus utilisé en Algérie) sur une espèce végétale potentiellement tolérante par un test de phytotoxicité. Par la suite un test sera réalisé pour faire une comparaison avec d'autres espèces, et plusieurs substrats seront utilisés pour étudier l'adaptation aux changements de sols.

- Le document sera structuré comme suit :
- Une première partie de ce travail qui consistera en une analyse bibliographique avec un aperçu général sur quelques études importantes réalisées à Tizi-Ouzou, en Algérie et dans le monde concernant notre thématique, des généralités sur le sol et la pollution du sol par les produits pétroliers et leurs impacts sur les milieux naturels ;
- Une seconde partie sera consacrée aux investigations sur le terrain et diverses expérimentations au niveau du laboratoire, notamment les descriptions et présentation des sites d'études, du matériel et des méthodes utilisés. Enfin, seront présentés les résultats obtenus puis discutés pour finir avec une conclusion.

CHAPITRE I
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Synthèse des travaux effectués par rapport à la thématique

Certains hydrocarbures pétroliers présentent un risque extrême pour la santé publique ou la biosphère, que ce soit par danger d'incendie, d'explosion, atteinte du tissu biologique, toxicité directe ou encore asphyxie. L'exposition à long terme à des composés d'hydrocarbures tels que le benzène (un additif commun à l'essence) ou le benzo[a]pyrène (un composant des gaz d'échappement du diesel) augmente le risque de cancers par exemple (Pichtel, 2007).

Les dangers liés à la manipulation des produits pétroliers sur l'environnement peuvent se manifester autant à petite échelle, avec par exemple des rejets occasionnés par les activités d'une station-service, qu'à grande échelle, cas des grandes catastrophes écologiques lors des accidents de bateaux transportant des produits pétroliers. Nous citerons ici quelques cas connus de déversement de produits pétroliers. En 1980, le Juan Antonio Lavalleja a déversé 28 000 tonnes de condensat (une mixture liquide d'hydrocarbures légers) après avoir heurté une digue dans le port d'Arzew et en 1986, l'Oued Gueterini a déversé 15 tonnes de bitume dans le port d'Alger (International Tanker Owners Pollution Federation Limited, 2019).

Des travaux ont montré que les activités anthropiques peuvent causer des contaminations plus ou moins sévères des différents compartiments de l'environnement (sol, air, eau). C'est le cas notamment de la distribution et de la manipulation de divers produits pétroliers qui peuvent être une source de contamination. Exemple des stations-services, qui même avec les réglementations environnementales existantes peuvent contaminer le sol à proximité (Borowiec *et al.,* 2008), des anciennes cokeries où on peut retrouver des quantités importantes de métaux lourds et HAP (Dazy *et al.,* 2009) ou encore des raffineries industrielles où la pollution peut être localisée profondément dans le sol (Rhbal *et al.,* 2010).

1.1. En Algérie et en Méditerranée

1.1.1. Pollution des sols

Nemer (2015) a signalé des contaminations du sol à proximité de plusieurs stations-services dans la région de Tizi-Ouzou, avec des effets négatifs sur le sol et la végétation. La raison étant des rejets de produits pétroliers directement dans le milieu naturel sans traitement préalable (interdit par la réglementions en vigueur). Djellouli *et al.,* (2009) ont mis en évidence, à proximité d'une zone industrielle dans le nord-ouest algérien, des concentrations d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) plus élevées comparativement à celles des zones urbaines et rurales, confirmant le rôle du secteur industriel dans ce genre de pollution.

1.1.2. Pollution sur les côtes de la Méditerranée

La côte algérienne est sujette aux eaux usées urbaines et industrielles non traitées et aux nappes d'hydrocarbures notamment. Ainsi plusieurs zones sont classées comme étant dans un état préoccupant ; c'est le cas de la baie d'Alger, d'Oran, de Skikda et d'Arzew (Agence Européenne pour l'environnement, 2006). Le trafic de pétroliers dans les terminaux d'exportation, avec les diverses opérations de nettoyage et les rejets illégaux qui s'y produisent, ainsi que les trois raffineries de Skikda (la plus grande raffinerie d'Afrique), Arzew et Alger sont les sources majeures de la pollution de la Méditerranée par les hydrocarbures (Benmecheta et Belkhir, 2016). Nafissa *et al.,* (2005) ont signalé une contamination de l'environnement marin dans la baie de Skikda avec plusieurs paramètres au-dessus des normes, dont les hydrocarbures. Labar *et al.,* (2012) ont rapporté une contamination des eaux souterraines par des hydrocarbures pétroliers dans la zone industrielle pétrochimique de Skikda, avec une dégradation de la qualité des eaux. Toutes ces études montrent les dégâts que l'industrie pétrochimique peut engendrer sur les milieux naturels.

1.1.3. Pollution de l'air

Fadel *et al.,* (2007) ont observé une assez forte pollution de l'air par les hydrocarbures dans la ville de Skikda (région Algérienne la plus importante de la pétrochimie) due notamment aux émissions de l'industrie pétrochimique, du trafic automobile et des foyers domestiques. La méthode utilisée dans cette étude fait appel à la bioindication, par l'utilisation d'une espèce lichénique (*Physcia biziana*). Kerbachi *et al.,* (2006) ont relevé des concentrations élevées en hydrocarbures aromatiques dans l'air de la ville d'Alger, déduisant que cette pollution serait due au trafic automobile très important.

1.2. Dans le monde

1.2.1. Les effets sur les organismes vivants

Divers travaux ont permis de démontrer les effets toxiques des produits pétroliers sur les plantes et les invertébrés (Adam et Duncan, 2002 ; Erstfeld and Snow-Ashbrook, 1999). Ainsi, les hydrocarbures peuvent affecter la germination des plantes (Ogbo, 2009), leur physiologie et leur morpho-anatomie (Gillian Adam et Duncan, 2002 ; Baek *et al.,* 2004 ; Baruah *et al.,* 2014 ; Song *et al.,* 2011). Ils réduisent aussi la faune du sol (Castellanos *et al.,* 2013). Cependant, ces effets dépendent de plusieurs paramètres, tels que la composition des produits (Baker, 1970), le niveau de concentration (Luhach et Chaudhry, 2012) et le type d'organisme affecté ; certaines

espèces étant plus tolérantes que d'autres (Kerbachi *et al.,* 2006 ; Ogbo, 2009). Le comportement des espèces varie aussi et beaucoup dans un milieu pollué ; certaines espèces de collemboles par exemple évitent la contamination alors que d'autres sont attirés par la contamination (Gass *et al.,* 2006).

Les effets sur les organismes vivants peuvent se faire soit de manière directe, soit indirecte, à travers des changements intervenants dans le sol après contamination. Ainsi plusieurs paramètres peuvent être affectés tel que le pH, l'azote et le carbone, qui sont importants pour les espèces végétales (Akpan et Udoh, 2013).

Les transects sont utilisés pour étudier les effets des gradients de pollution sur les communautés végétales (Dazy *et al.,* 2009) et les communautés de macrofaune (Erstfeld et Snow-Ashbrook, 1999 ; Grzes´, 2009), et les analyses écologiques peuvent être utilisées pour comprendre les changements dans les communautés végétales (Dazy *et al.,* 2009) et les communautés de macrofaune (Grzes´, 2009) le long des gradients de pollution dans les sites contaminés.

1.2.2. Dépollution des sols contaminés

Les contaminants organiques sont présents à des concentrations élevées dans le sol et les eaux souterraines sur de nombreux sites pollués par des déchets dangereux. Ces produits chimiques peuvent être des sous-produits de la production industrielle ou encore résultant de fuites des réservoirs de stockage. Dans ce genre de cas, la contamination des sols est souvent très dispersée de sorte que les techniques de dépollution conventionnelles seraient coûteuses ou, dans certains cas, peu pratiques (Kömives et Gullner, 2000). Face à la problématique de la pollution des milieux naturels par les produits pétroliers, diverses études se sont penchées sur les diverses techniques de bioremédiation (bioventing, bioslurping, phytoremédiation…). Cette dernière, définie comme l'utilisation de plantes pour extraire, accumuler et/ou détoxifier les contaminants environnementaux, est une méthode de « nettoyage » des milieux naturels alternative aux techniques de dépollution classiques impliquant notamment des procédés physiques et chimiques lourds. Elle est, de ce fait, plus respectueuse de l'environnement que les techniques classiques de dépollution (Mandal *et al.,* 2014 ; Onwurah *et al.,* 2007 ; Pichtel, 2007) et est moins couteuse financièrement (Shirdam *et al.,* 2008). Certaines plantes possèdent une capacité remarquable à survivre et même à prospérer dans des sols qualifiés de dangereux (Pichtel, 2007). Dans le but de développer les techniques comme la phytoremédiation, il est nécessaire de rechercher et d'étudier les espèces végétales qui peuvent croître sur des sols contaminés par des produits pétroliers (Gillian Adam et Duncan, 2002 ; Shirdam *et al.,* 2008). Les tests de

phytotoxicité sont ainsi un bon moyen pour sélectionner les espèces tolérantes aux hydrocarbures. Ces espèces pourraient, par la suite, être étudiées par des tests de phytoremédiation pour évaluer leur potentiel dans la remédiation des sols contaminés par des produits pétroliers.

2. Le sol

2.1. Constitution du sol

Les principaux constituants des sols (Fig. 1) sont les minéraux des sols, des mélanges de fragments de roches parentales altérées et non altérées ainsi que des minéraux néoformés, et les matières organiques qui participent à la dynamique des éléments chimiques et contribuent et participent à la stabilité de la structure du sol (Calvet, 2013).

La composition chimico-minéralogique notamment la richesse relative en minéraux argileux, influe fortement sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants apportés par infiltration et contribue à déterminer son climat chimique et la disponibilité de colloïdes. Quant à la teneur en matière organique, elle joue un rôle à la fois sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants, sur le climat chimique, la disponibilité de colloïdes et sur les réactions biochimiques amenant à leur dégradation (Lemière *et al.*, 2008).

Le sol est aussi constitué de pores, d'une atmosphère et de l'eau qui véhicule des substances en solution, exogènes ou endogènes, jouant un rôle dans la formation et l'évolution des sols, dans la nutrition des plantes et éventuellement dans la contamination des nappes (Gobat *et al.*, 2012).

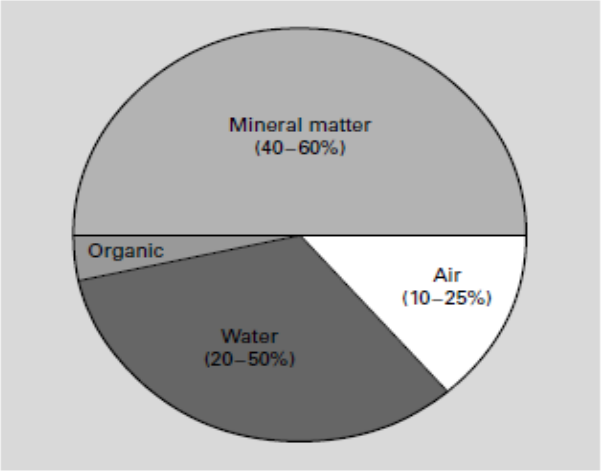


Figure 1. Composantes principales du sol *(White, 2005)*

2.2. Les plantes et le sol

Le sol est un support pour les plantes, il leur fournit les éléments nutritifs dont elles ont besoin pour se développer et permet, entre autres, la constitution d'une réserve d'eau, chose importante quand les précipitations ou l'irrigation ne sont pas suffisantes (Foth, 1990). Les flux d'éléments entre le sol et les plantes ont lieu dans la rhizosphère qui est définie comme le volume de sol situé autour des racines vivantes et soumis à leurs activités (Stengel et Gelin, 1998). Les racines des plantes influencent le sol et dépendent de ce dernier. Ainsi, la racine change les propriétés physico-chimiques du sol. De plus, la distribution et la densité des racines dépendent à la fois de l'environnement du sol et des espèces végétales en question (Foth, 1990 ; Gobat *et al.*, 2012).

2.3. La faune du sol

Selon Stengel et Gelin (1998), la faune du sol représente plus de 80% de la biodiversité animale totale. Elle est représentée par 3 catégories selon un critère de taille (en plus de la mégafaune cas de certains mammifères comme les taupes) :

- La microfaune regroupant les animaux de taille inférieure à 0,1 mm (nématodes, protozoaires, rotifères) ;
- La mésofaune de taille entre 0,1 et 2 mm (acariens, collemboles, protoures, diploures, symphyles, enchytréides) ;
- La macrofaune de taille supérieure à 2 mm (insectes, arachnides, myriapodes, mollusques et lombricidés).

Les organismes composant la faune du sol peuvent consommer des proies vivantes (carnivores), des fragments de plantes (herbivores, xylophages) ou de champignons (mycophages). De même, ils peuvent se nourrir d'animaux morts (nécrophages) ou de débris végétaux morts (saprophages) (Berthelin et Toutain, 1979).

Les espèces appartenant à la faune du sol ne sont pas uniquement des habitants du sol mais font partie intégrante de celui-ci, participent à son fonctionnement, à son évolution et même plus modestement à sa genèse (Stengel et Gelin, 1998).

3. Pollution du sol par les hydrocarbures

3.1. Définition du sol pollué

Un sol pollué est une zone non saturée comprise entre la surface du sol et le niveau de la nappe phréatique qui, du fait de négligences, défaut de conception ou de maintenance, non-respect de

la législation à la suite d'activités diverses, conduit à l'apparition de dommages et risques immédiats ou différés pour les usagers ou pour l'environnement (Ricour et Lallemand-Barrès, 1994).

Les hydrocarbures sont les constituants de la plupart des mélanges combustibles, carburants et lubrifiants. Leur présence dans un sol contaminé est liée aux industries de raffinage et de transformation, leur transport, leur stockage et leur distribution. On note aussi des pollutions par les sous-produits rejetés (notamment les huiles moteurs et les huiles de coupe usagées, des résidus de dégraissage accompagnant les solvants). Certains hydrocarbures sont utilisés comme solvants industriels et/ou comme base à des synthèses chimiques (cyclohexane, hexane, etc.) (Lemière *et al.*, 2008).

3.2. Hydrocarbures

Le pétrole brut est composé, presque en totalité, d'hydrocarbures de trois types principaux : les paraffiniques, les naphténiques (ou cycloalcanes) et les aromatiques, auxquels viennent s'adjoindre du soufre, des traces de composés oxygénés et azotés et quelques métaux. Leur composition est variable selon l'origine (Colin *et al*, 2000). Le pétrole brut doit être raffiné pour séparer ses divers constituants en fractions utiles commercialisables. Ces fractions sont souvent encore distillées pour produire un produit commercial spécifique. Les hydrocarbures pétroliers dans le pétrole brut possèdent des points d'ébullition différents, en fonction du nombre et de la disposition des atomes de carbone dans leurs molécules. La distillation fractionnée, réalisée dans une tour de distillation utilise la différence de point d'ébullition pour séparer les hydrocarbures contenus dans le pétrole brut (Fig. 2). Les bruts légers ont tendance à contenir davantage des fractions d'essence, de naphta et de kérosène, tandis que les bruts lourds contiennent davantage de diesel et de résidus (Pichtel, 2007). On distingue plusieurs coupes pétrolières : les essences ; les kérosènes C11-C13 ; les gazoles légers C14-C18 ; les gazoles lourds C19-C25 ; les huiles C26-C40 ; les résidus > C40 (Colin *et al.*, 2000).

Les composés aromatiques volatils, tels que le benzène, le toluène, les éthylbenzènes et les xylènes (BTEX), sont des constituants caractéristiques des pollutions par des combustibles dérivés du pétrole. Les hydrocarbures aliphatiques halogénés de faible poids moléculaire utilisés comme solvants, en particulier, le 1,1,1-trichloroéthane, le tétrachloroéthylène et le trichloroéthylène, sont des polluants particulièrement répandus (Barriuso *et al.*, 1996).

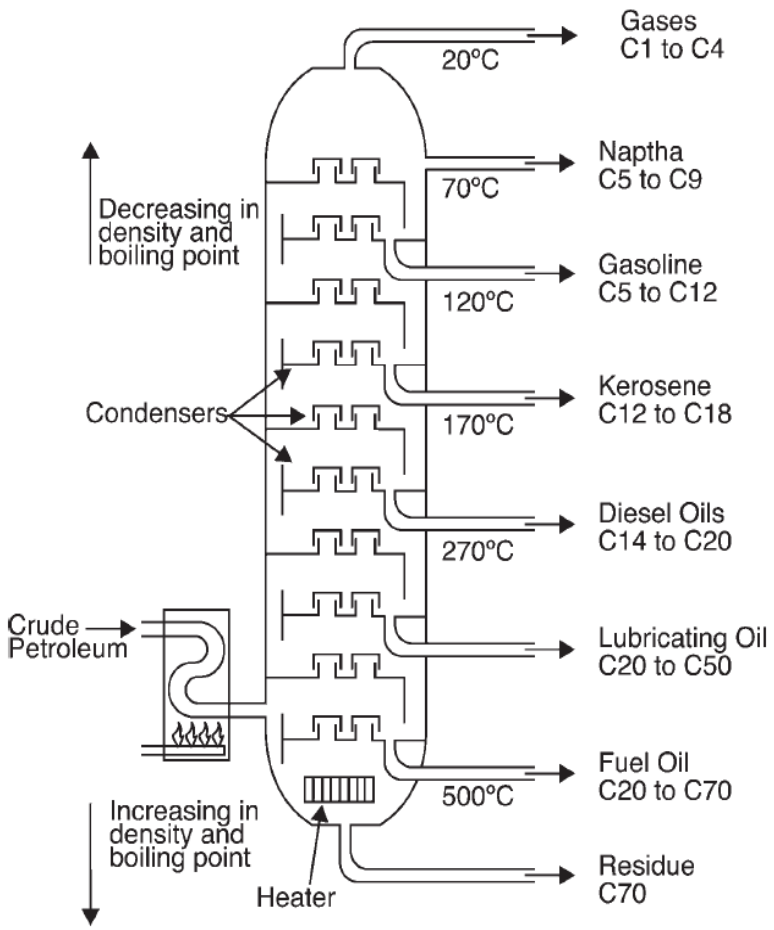


Figure 2. Schéma d'une tour de distillation utilisée pour le raffinage du pétrole *(Pichtel, 2007)*

Le diesel est le carburant le plus utilisé en Algérie. Les mélanges de carburants diesel sont un compromis entre facilité de démarrage (forte volatilité) et bonne économie de carburant (faible volatilité) (Pichtel, 2007). Les diesels, majoritairement constitués des n-alcanes et cycloalcanes, contiennent 2000 à 4000 hydrocarbures différents (Saada *et al.*, 2006). Les gaz d'échappement des moteurs diesel ont été classé comme étant cancérogènes pour l'homme (Centre international de Recherche sur le Cancer, 2012).

3.3. Comportement des hydrocarbures dans le sol

Le comportement des hydrocarbures dans les milieux naturels varie en fonction de plusieurs facteurs. Plus le nombre d'atomes de carbone constituant la coupe d'hydrocarbures est important, plus la solubilité, la volatilité et la biodégradabilité sont faibles, et plus importantes sont la densité, l'hydrophobie, la stabilité et la viscosité (Lemière *et al.*, 2008 ; Saada *et al.*, 2006).

L'utilisation des produits pétroliers est susceptible de produire des contaminations dans les différents compartiments de l'environnement : l'air, l'eau et la contamination du sol qui est une étape importante. Ainsi le comportement des hydrocarbures dans le sol va définir leur dispersion vers d'autres compartiments de l'environnement. La concentration du polluant dépend de l'origine et de la nature de la source de pollution et la quantité du polluant arrivant à une cible donnée dépendra des phénomènes de transport impliqués dans la dispersion du polluant. La dégradation intrinsèque et la dispersion des hydrocarbures sont des phénomènes compétitifs qui peuvent être observés une fois qu'ils atteignent le sol. La volatilisation et le flux d'infiltration génèrent la pollution de l'eau de surface et de l'eau souterraine respectivement, ce qui peut altérer les propriétés physico-chimiques du sol et la contamination de la nappe phréatique. Ainsi, le sol joue un rôle majeur dans la régulation des pollutions avec un double rôle d'épuration et de stockage des polluants (Barriuso *et al.,* 1996 ; Rhbal *et al.,* 2010).

Divers facteurs influent sur les processus d'atténuation naturels des hydrocarbures pétroliers et de leurs additifs. Les principaux mécanismes abiotiques sont l'adsorption et la volatilisation pour la zone non saturée et la dissolution, la dispersion, la volatilisation et l'adsorption pour la zone saturée. La biodégradation est l'un des mécanismes majeurs d'atténuation naturelle puisqu'elle permet la perte en masse des contaminants de façon significative en conditions favorables. L'atténuation naturelle des hydrocarbures pétroliers se traduit principalement par leur biodégradation dans les sols et eaux souterraines, elle est initiée par des micro-organismes naturellement présents dans le milieu dès qu'une pollution par des hydrocarbures apparaît (Saada *et al.,* 2006).

4. Les stations-services

4.1. Présentation d'un plan type de stations-services

Une station-service peut être constituée généralement de trois zones principales (Fig. 3) ; une zone de distribution composée de bornes de distribution destinées à l'approvisionnement en carburant des clients. Une zone de dépotage (où s'effectue le remplissage des cuves de carburant par camion-citerne) et une zone boutique et caisse (Patej, 2002).

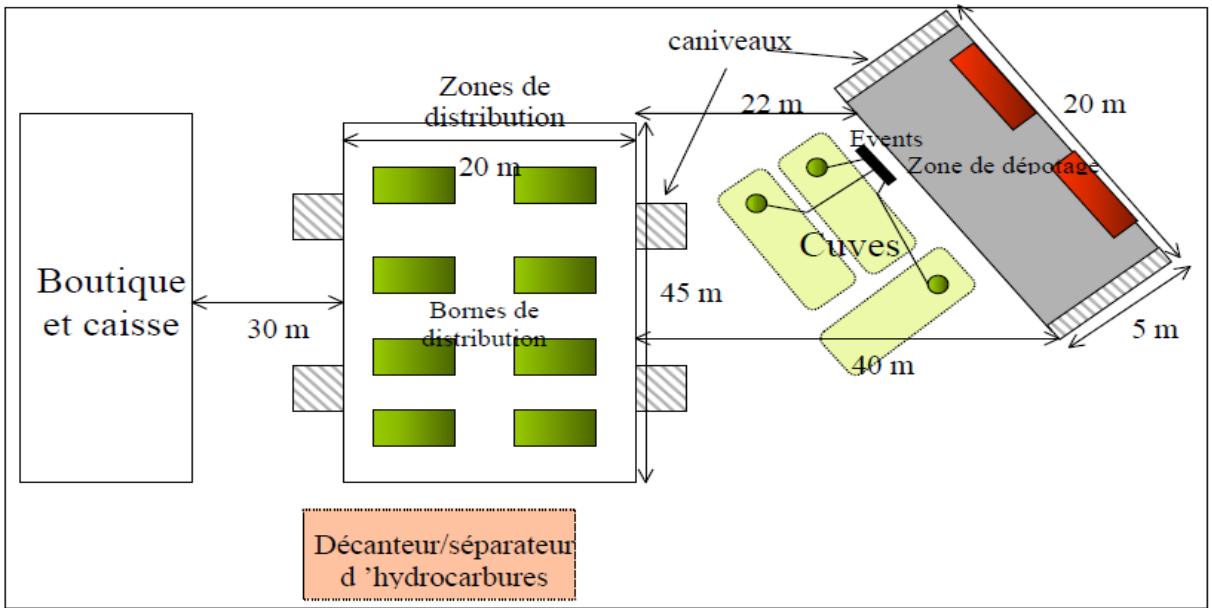


Figure 3. Configuration générale d'une station-service d'une aire d'autoroute *(Patej, 2002)*

4.2. Gestion des aspects environnementaux dans une station-service

Sur le plan réglementaire, les stations-services sont des installations soumises à la réglementation en vigueur (décret n° 06-198 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement, décret n° 07-144 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement et décret n° 07-145 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement). Avant la mise en service d'une station-service, elles doivent avoir fait préalablement l'objet d'une demande d'autorisation d'exploitation, qui suite à une démarche comprenant notamment une enquête publique et la réalisation soit d'une étude d'impact sur l'environnement et d'une étude de dangers, soit d'une notice d'impact sur l'environnement et d'un rapport sur les produits dangereux, ou dans le cas des petites stations, d'une simple déclaration, peut se voir soit accordé l'autorisation d'exploitation soit se la voir refuser, s'il est jugé que l'installation de la station-service sur le site d'implantation peut avoir des impacts négatifs significatifs sur l'environnement et/ou la population du site, sans que des mesures d'atténuation ne puissent réduire les risques liés à l'exploitation de la station-service à un niveau acceptable. Une station-service doit aussi obtenir une autorisation de la part du ministère de l' Énergie (Journal Officiel de la République Algérienne, 2007a, 2007b, 2006b).

Lors de la mise en marche d'une station-service, il doit être fourni des analyses des rejets d'eaux usées conformément à des valeurs précisées par décrets (décret n°09-209 fixant les modalités d'octroi de l'autorisation de déversement des eaux usées autres que domestiques dans un réseau

public d'assainissement ou dans une station d'épuration, décret n° 06-141 définissant les valeurs-limites des rejets d'effluents liquides industriels). Par la suite, des analyses périodiques devront être faites en se basant généralement sur une liste réduite de paramètres spécifiques à l'activité en question. La station-service devra obligatoirement être équipée d'un déshuileur qui séparera les huiles des eaux et les huiles usagées devront obligatoirement être récupérées par des entreprises de récupération spécialisées telles que Naftal. Le rejet dans le milieu naturel de substances polluantes est strictement interdit par la règlementation en vigueur (Journal Officiel de la République Algérienne, 2006a, 2009).

Du point de vue technique, prévenir la pollution des eaux pluviales et gérer les eaux usées sont deux importantes questions environnementales (Department of Environment and Climate Change, 2008). Ainsi, les zones sensibles d'une station-service telle que les zones de dépotage et de distribution sont soumises à une pente et sont équipées de caniveaux récupérant tous les effluents. Les caniveaux sont reliés à un décanteur/séparateur d'hydrocarbure enterré et muni ou non d'une cuvette de rétention qui sépare les huiles et autres matières en suspension des eaux. Les substances polluantes doivent être récupérées par des entreprises de recyclage agrée (Patej, 2002).

Les cuves contenant le carburant possèdent une évacuation sous forme d'évents situés à l'air libre et en partie haute (Patej, 2002), qui servent à évacuer les vapeurs de carburants. Les émissions de vapeur et les pertes d'essence qui en résultent peuvent être réduites de 50% en récupérant les vapeurs lors des livraisons de carburant (Department of Environment and Climate Change, 2008).

La plupart des cuves et canalisations contenant des carburants actuellement sont faites d'enveloppes double peau avec entre elles un produit antigel, et par mesure de ce dernier, on peut vérifier la présence ou non d'une fuite qui peut être due à la corrosion, à un glissement de terrain, séisme… (Patej, 2002).

4.3. Rejets dans l'environnement

Les principaux problèmes environnementaux liés aux stations-services sont les déversements de diesel et d'essence, la pollution par les eaux de ruissellement, la contamination du sol et des eaux souterraines, les émissions de vapeurs et gaz à effet de serre (Department of Environment and Climate Change, 2008).

Selon l'administration de l'environnement du Luxembourg (2014), les stations-services peuvent émettre plusieurs sortes de polluants, qui peuvent être :

- Des gaz : COV (par le **s**tockage et transvasement de l'essence), CO, CO_2 (moteurs en marche des véhicules), hydrocarbures imbrûlés, NOx et particules, vapeurs d'essence (évents d'évacuation) ;
- Des odeurs : stockage et transvasement du diesel et lavage de véhicules ;
- Des déchets solides : autres les déchets domestiques, on retrouve des chiffons sales, des boues venant des séparateurs et des déchets d'emballage de divers produits pour véhicules ;
- Des effluents liquides **;** huiles usagées, eaux de lavage de voitures, eaux de nettoyage des surfaces de circulation, eaux de pluie lessivant des surfaces susceptibles d'être polluées (aires de service, parkings, distribution de carburants, etc.). Ces eaux sont potentiellement chargées de particules solides ou de substances utilisées par les véhicules, comme les hydrocarbures (essence, huiles à moteur etc.) ou les détergents.

À cela s'ajoutent les déversements accidentels de diverses substances (diesel, essence, liquides de freins, liquides de refroidissement, acides de batteries ou solvants). Un déversement direct dans la nature conduirait à des effets toxiques. Un diversement dans l'égout affecterait le fonctionnement des stations d'épuration.

4.4. Impacts sur l'environnement

Selon Patej (2002), la plupart des accidents survenant dans les stations-services mènent à la pollution du sol ou sous-sol, et moins fréquemment à des incendies et explosions. La pollution du sol et sous-sol étant soit chronique résultant généralement de la corrosion des cuves enterrées, soit accidentelle due à un déversement d'hydrocarbures lors de la distribution ou du remplissage des stockages.

Les substances polluantes émises par les stations-service peuvent avoir des impacts sur les différents compartiments de l'environnement :

4.4.1. Air et santé

Selon Meybeck *et al.,* (2006), les stations-services représentent l'une des principales sources d'émissions dans l'air ambiant de BTEX, polluants de la famille des composés organiques

volatils (COV). Lors du remplissage du réservoir de leur véhicule, les usagers sont amenés à subir une surexposition aux vapeurs de BTEX qui s'échappent dans l'air ambiant.

Nous retrouvons les COV qui présentent plusieurs dangers pour la santé, notamment le benzène qui est cancérigène, le CO (toxique pour les organismes vivants), le CO_2 (gaz à effet de serre), les hydrocarbures imbrûlés (potentiellement cancérigènes et contribuent en réagissant avec les oxydes d'azote à la formation d'ozone troposphérique), ainsi que des particules qui peuvent induire des maladies pulmonaires (Administration de l'environnement du Luxembourg, 2014).

4.4.2. Eaux

Les fuites de carburants dans les cuves de stockage enterrées représentent un important problème de contaminations des eaux souterraines (Wu *et al.,* 2017), des substances dangereuses toxiques tels que les MTBE, les BTEX et les HAP peuvent contaminer les eaux, ce qui peut causer un sérieux problème (Duka *et al.,* 2015). Il y a globalement deux manières possibles de contamination des eaux par les activités d'une station-service. La première est la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines à proximité de la station par des rejets directs, des fuites ou encore par les eaux de ruissellement, ceci peut conduire à l'altération de la qualité des eaux, avec des effets négatifs sur les organismes vivants et la santé des populations utilisant ces eaux et aussi rendre ces eaux inutilisables pour l'agriculture. Selon Bergue et Mérienne (1986), quand les hydrocarbures sont répandus sur le sol, malgré leur faible densité (pour un grand nombre inférieur à 1), ils ont tendance à s'étaler à la surface et à s'infiltrer dans les couches superficielles perméables non saturées en eau. Le degré de pénétration de l'huile étant fonction de la nature et de la structure du sol et aussi de la quantité et de la nature du produit déversé. Un produit de faible viscosité pénètre rapidement dans un sol sec et poreux et s'étale donc peu à la surface, inversement, sur un sol saturé d'eau de type argileux, le produit s'étale largement d'autant plus que sa viscosité est relativement élevée. La deuxième possibilité de contamination des eaux est la perturbation du fonctionnement des stations d'épuration accueillant des eaux usées non conformes aux limites de rejets décrétées.

Selon Bergue et Mérienne (1986), la solubilité des hydrocarbures dans l'eau dépend de leur nature. Les composés légers sont relativement solubles, très volatils et normalement facilement biodégradables. Les produits plus lourds sont très peu solubles et n'ont, en général, que peu d'effets organoleptiques. Les produits intermédiaires à poids moléculaire moyen, tels que ceux que l'on trouve dans les fuels légers et le pétrole brut, sont plus préjudiciables à la qualité des eaux.

4.4.3. Sol

La pollution des sols par des hydrocarbures pétroliers est l'un des plus importants problèmes environnementaux dans certaines zones, notamment autour des raffineries de pétrole et autres installations industrielles. Les résultats de plusieurs études ont montré des concentrations en hydrocarbures très au-dessus des normes dans des sols à proximité des stations-service (Borowiec *et al.,* 2008 ; Parvizi Mosaed *et al.,* 2015).

Après une contamination, certains hydrocarbures disparaissent au cours du temps, alors que d'autres persistent et ne subissent pas une grande réduction, c'est le cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont fortement absorbés par la matière organique, de ce fait moins disponible pour le métabolisme microbien (Rhbal *et al.,* 2010). En fait, une grande partie des constituants des produits pétroliers sont volatils et instables dans des conditions normales. Il y a évaporation des fractions les plus légères et des réactions physico-chimiques modifient leurs compositions. Il est probable qu'en contact avec le sol, ils subissent une grande variété de mécanismes d'élimination notamment l'évaporation, la photo-décomposition, l'adsorption, la percolation et la dégradation bactérienne (Bergue et Mérienne, 1986).

La pollution du sol par les hydrocarbures a des effets évidents sur les caractéristiques biologiques, chimiques et physiques et entraîne une diminution des éléments nutritifs, de la productivité et la production végétale du sol (Parvizi Mosaed *et al.,* 2015). Ainsi, des produits pétroliers comme le diesel, par exemple, peuvent provoquer la modification des propriétés du sol (humidité, soufre, pH, azote, rapport C/N, cations basiques ou encore la capacité d'échange cationique) (Akpan et Udoh, 2013 ; Bergue et Mérienne, 1986), altérant de cette façon la qualité du sol.

La contamination des sols par des hydrocarbures pétroliers peut altérer négativement les écosystèmes du sol et les cycles d'éléments nutritifs. Les populations microbiennes sont inhibées, même si certains microorganismes peuvent augmenter leur activité métabolique dans de telles conditions. Les effets dépendent de plusieurs facteurs, tels que les propriétés du sol et le type de contaminant. En général l'essence exerce des effets négatifs plus importants sur l'activité hydrolase (impliquée dans les cycles d'azote, de carbone et de phosphore) comparé aux hydrocarbures lourds comme le diesel et le pétrole brut (Labud *et al.,* 2007).

4.4.4. Végétation et faune

Beaucoup de travaux ont démontré les effets négatifs des produits pétroliers sur les espèces végétales et animales. La contamination des sols par les hydrocarbures peut affecter la diversité et l'abondance de la macrofaune du sol (Erstfeld et Snow-Ashbrook, 1999), la biométrie et la physiologie des plantes (Hawrot-Paw *et al.*, 2015), leur germination et leur croissance (Bona *et al.*, 2011 ; Luhach et Chaudhry, 2012). Les dommages dépendront de plusieurs facteurs, comme l'âge de la contamination du sol (Bona *et al.*, 2011 ; Cruz *et al.*, 2014), le niveau de contamination (Luhach et Chaudhry, 2012 ; Ogbo, 2009) et le type d'espèces (Gillian Adam et Duncan, 2002 ; Ogbo, 2009).

Les hydrocarbures lourds tels que le diesel et le pétrole brut, exercent des effets négatifs plus importants sur la croissance et la germination des plantes comparés aux hydrocarbures plus légers comme l'essence (Labud *et al.*, 2007).

4.4.4.1. Influence de la pollution sur la structure de la végétation

Un sol contaminé par des polluants, peut avoir comme conséquence la modification de la structure de la végétation qui s'y trouve (Fig. 4). On assiste alors à l'apparition de gradients de végétation liés aux concentrations en polluant dans le sol contaminé (Colin *et al.*, 2000 ; Dazy *et al.*, 2009). Ainsi, d'une manière générale, plus la concentration en substances polluantes dans le sol est importante, plus le développement de la végétation est affecté négativement, il y a donc un gradient de végétation qui suit le gradient de pollution. Par exemple, dans un test de phytotoxicité, Colin *et al.*, (2000) montrent les effets d'une terre contaminée par des solvants chlorés sur la croissance d'une espèce végétale, *Hordeum vulagre* (l'orge) ; les différences entre les diverses dilutions de terre sont montrées dans la figure 4. Baruha *et al.*, (2014), dans une autre expérience (Fig. 5) montrent cette fois-ci les effets du pétrole brut sur une espèce végétale (*Cyperus brevifolius*), où nous observons une meilleure croissance au niveau du témoin et la plus mauvaise au niveau de la plus forte dose de contamination au pétrole brut.

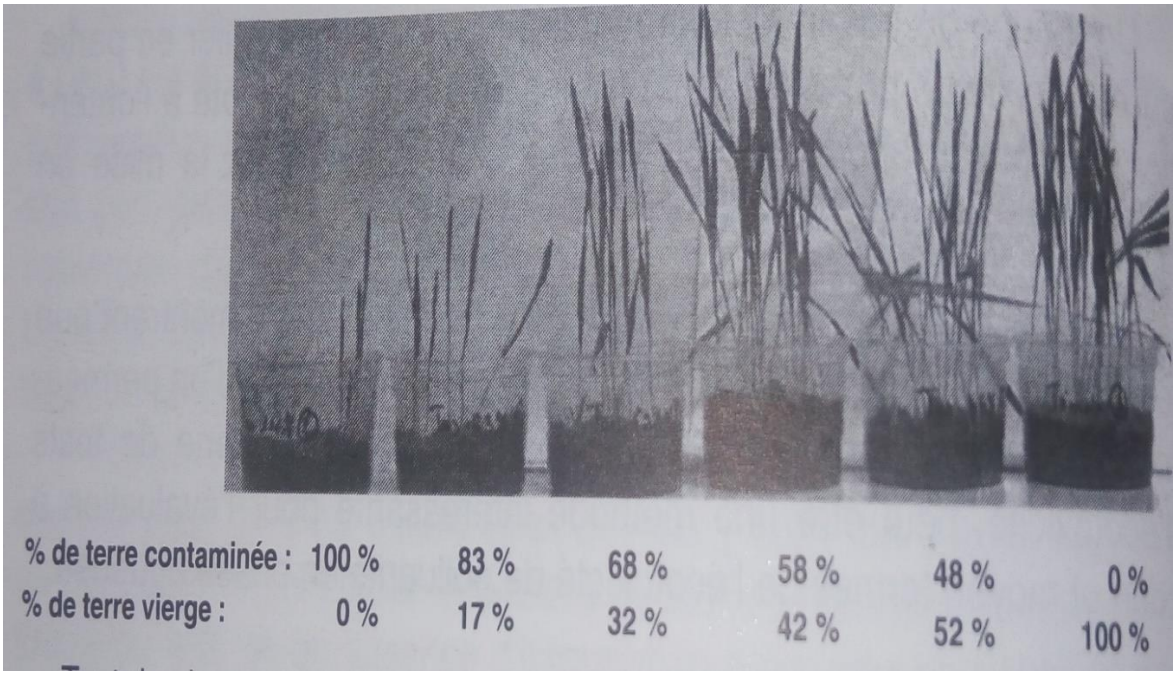


Figure 4. Test de phytotoxicité d'une terre polluée par des solvants chlorés *(Colin et al., 2000)*

Figure 5. Photo montrant une expérience de phytotoxicité par du pétrole brut, impliquant une espèce végétale (*Cyperus brevifolius*) *(Baruah et al., 2014)*.

Différentes mixtures de sol et de pétrole brut ont été appliqués. 1=10,000 ppm, 2= 20,000 ppm, 3=30,000 ppm, 4=40,000 ppm, 5=50,000 ppm, C =contrôle, Cs =control avec détergent.

Suite à la contamination d'un site, des concentrations importantes en divers polluants (HAP, métaux lourds…) peuvent être localisés dans le sol. Ce qui a pour effet de provoquer des changements dans la structure des communautés végétales du site en question. Ainsi, dans une investigation sur un site contaminé (ancienne cokerie), Dazy *et al.*, (2009) ont observé que les plantes annuelles et bisannuelles dominent les zones les plus polluées alors que les pérennes et

les ligneuses sont plus abondantes dans les zones les moins polluées (Fig. 6), la pollution augmentant de la zone 0 vers la zone 3 dans le premier transect, et de la zone 4 vers la zone 6 dans le deuxième transect. Les auteurs suggèrent que la structure de la végétation serait très influencée par des métaux comme le Cd et le Hg.

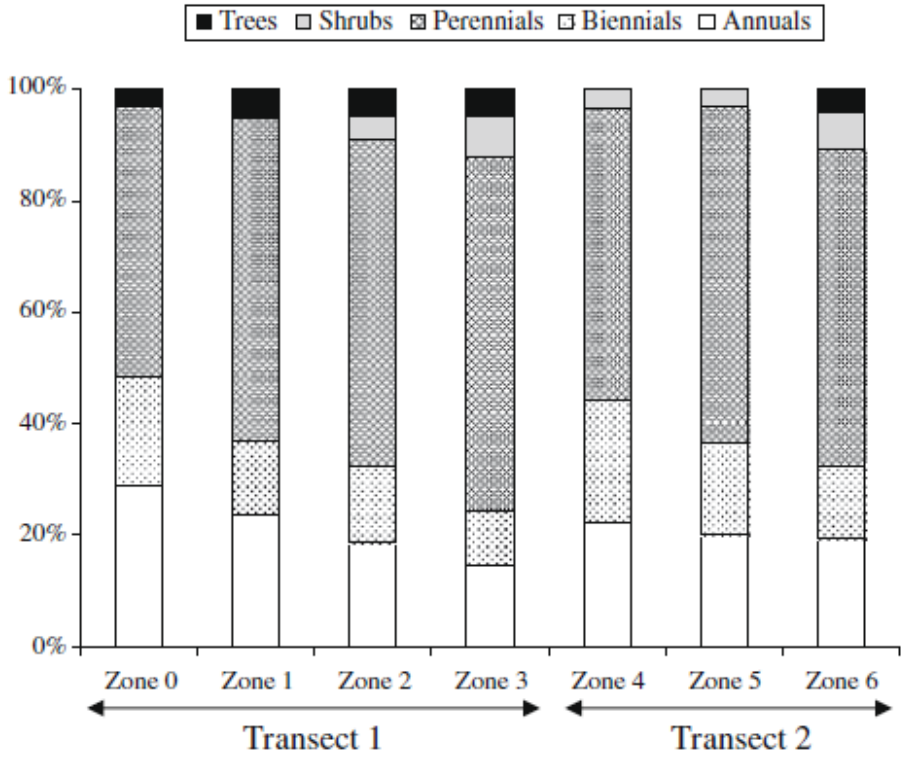


Figure 6. Variation de la structure de la végétation à travers 2 transects dans le site d'une ancienne cokerie *(Dazy et al., 2009)*

Dans les mêmes zones, il a aussi été observé des effets négatifs de la pollution sur la richesse en espèce et la diversité biologique (Indice de Shannon-Weaver) (Tableau 1).

Tableau 1. Variations de la richesse en espèce (S), de l'indice de Shannon-Weaver (H') et de l'équitabilité (J) à travers 2 transects dans le site d'une ancienne cokerie *(Dazy et al., 2009)*

Zones	*S*	*H'*	*J*
0	31	4.29	0.86
1	38	4.64	0.88
2	43	4.64	0.85
3	41	4.78	0.89
4	27	4.23	0.89
5	34	4.43	0.87
6	46	4.99	0.90

4.4.4.2. Germination

Dans un sol contaminé par des produits pétroliers, s'observent des effets négatifs multiples sur la germination des plantes : une phase de latence précédant la germination, une germination plus lente et un pourcentage de germination plus faible (Gillian Adam et Duncan, 2002). L'effet inhibiteur pourrait être attribué principalement aux contraintes physiques ainsi qu'aux dommages biologiques sur les semences résultant des caractéristiques physiques et chimiques des produits pétroliers. L'embryon d'une graine peut facilement être endommagé s'il devait entrer en contact avec du carburant diesel par exemple. Une raison plus probable de l'effet inhibiteur du diesel sur la germination est la propriété physique hydrofuge du carburant diesel. Le film de diesel autour des graines peut agir comme une barrière physique, empêchant ou réduisant l'entrée d'eau et d'oxygène dans les graines (Gillian Adam et Duncan, 2002 ; Amakiri et Onofeghara, 1984).

Dans le cas du diesel, la fraction volatile de ce carburant jouerait un rôle majeur dans le retard de la levée des semences et la réduction du pourcentage de germination. Adam et Duncan (2002), suggèrent que la toxicité aiguë causée par cette fraction légère du carburant diesel peut expliquer le retard de la levée des semences et la réduction du pourcentage de germination affiché par les plantes.

Dans la figure 7, nous rapportant un exemple d'un test de germination impliquant quelques espèces végétales. Nous apercevons clairement les effets inhibiteurs du diesel sur la germination totale des quatre espèces.

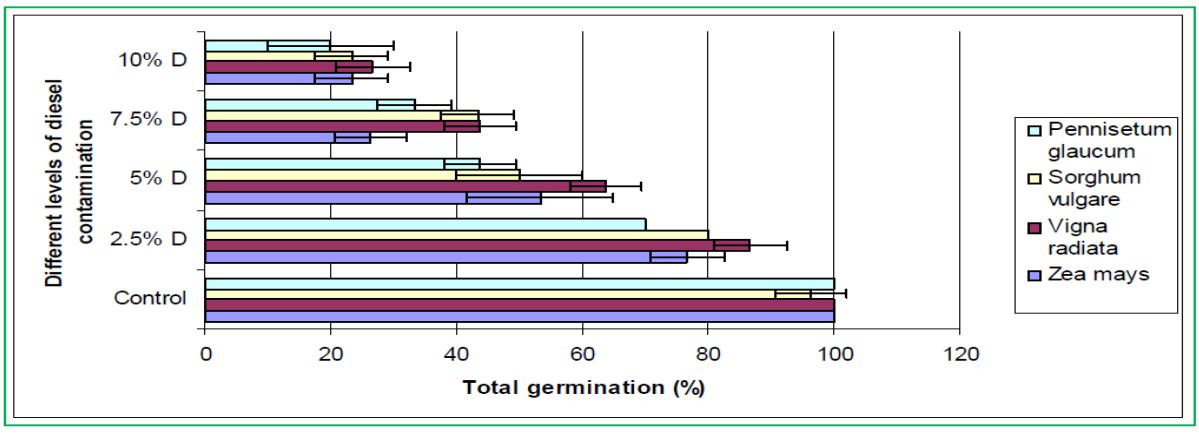


Figure 7. Germination totale de quelques espèces à différents niveaux de contamination par du carburant diesel *(Luhach et Chaudhry, 2012)*

4.4.4.3. Physiologie et anatomie

Le contact entre le produit pétrolier et la surface foliaire entraîne des dégâts qui dépendent de la nature du produit, de sa concentration et surtout de sa dispersion. Un produit léger à basse viscosité cause des dommages immédiats sous forme de brûlures des parties aériennes, alors qu'un produit lourd à viscosité élevée pénétrant plus lentement les tissus cause des dégâts chroniques moins apparents, mais réduit les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère. Dans les deux cas, la translocation dans la plante d'une partie du produit vers les zones de croissance entraînera des dégâts différés, nécroses ou déformations des zones de croissance, avec dans certains cas suppression ou retard de la floraison ou de la fructification (Bergue et Mérienne, 1986).

Les membranes des cellules peuvent être endommagées par la pénétration de molécules d'hydrocarbures. Les produits pétroliers réduisent le taux de transpiration, probablement en bloquant les stomates et les espaces intercellulaires. Ces effets sur les stomates pourraient être la raison de la réduction de la photosynthèse en plus de la réduction du nombre de stomates et de leur distorsion. La perturbation des membranes chloroplastiques est aussi évoquée. Les effets des huiles sur la respiration sont variables, mais une augmentation du taux de respiration se produit souvent (Baker, 1970 ; Baruah *et al.,* 2014 ; Gill *et al.,* 1992). Par ailleurs, les travaux de Baruah *et al.,* (2014) sur le pétrole brut ont montré que les teneurs en chlorophylles a et b et en chlorophylles totales foliaires des plantes cultivées dans différentes concentrations de pétrole brut se sont révélés inférieurs à celles des témoins ce qui va en faveur d'une baisse de l'activité photosynthétique.

L'observation des sections de nodules par microscopie optique a montré de nettes différences entre les nodules des échantillons témoins de la vesce commune (*Vicia sativa*) et les échantillons cultivés dans un sol contaminé au carburant diesel. Ainsi, malgré la réduction du nombre de nodules de la vesce cultivée sur sol contaminé par le Diesel par rapport à la vesce témoin, ces derniers étaient plus développés que les nodules des plantes témoins. Les nodules des plantes témoins étaient petits et immatures, alors que les nodules des plantes cultivées dans des sols contaminés par du carburant diesel étaient grands (Adam, 2003).

Baruah (2014) a observé les effets du pétrole brut sur l'anatomie de *Cyperus brevifolius*. Ainsi, il a rapporté de nombreuses déformations structurelles au niveau des feuilles, de la tige et du rhizome de la plante suite à des observations microscopiques sur des coupes transversales (Fig. 8 et 9). L'épaisseur de la région épicuticulaire était plus importante dans les échantillons

contaminés en raison d'un dépôt de cire à la surface de la plante. Des cellules parenchymateuses réduites et comprimées aux concentrations les plus élevées en polluant ont aussi été rapportées. Les faisceaux vasculaires ont été comprimés et déformés aux concentrations les plus élevées.

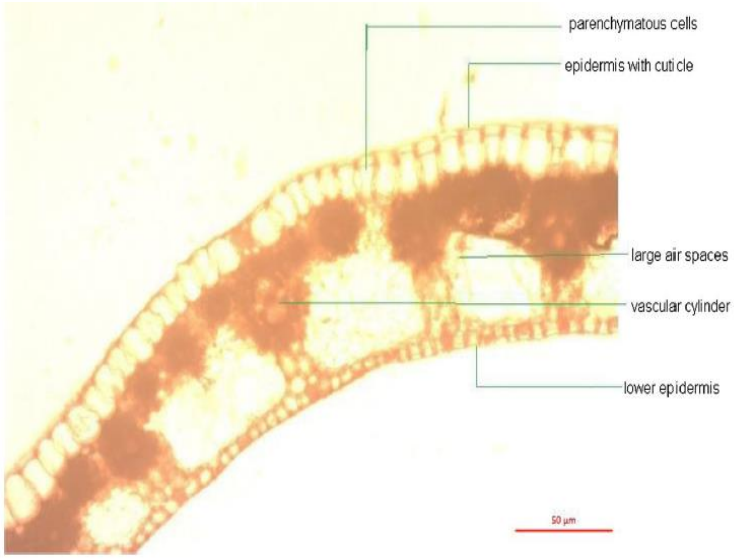


Figure 8. Coupe transversale d'une feuille de *Cyperus brevifolius* montrant les différentes structures des tissues dans un échantillon témoin (0 ppm) *(Baruah et al., 2014)*

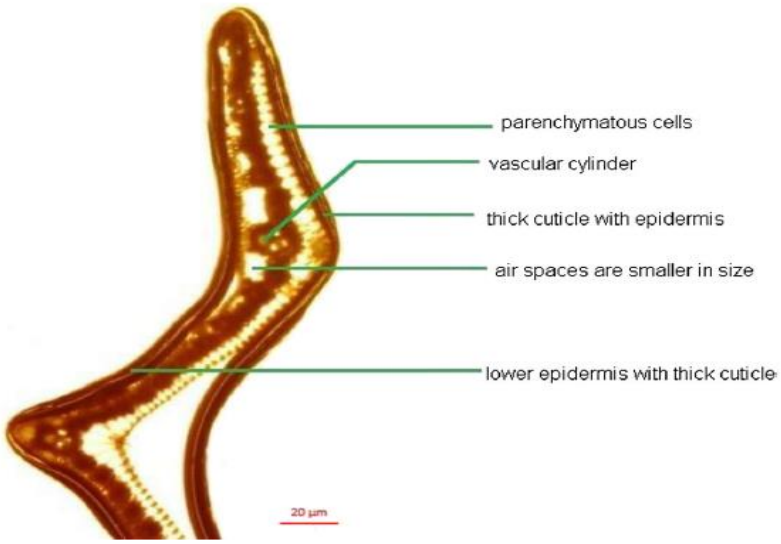


Figure 9. Coupe transversale d'une feuille de *Cyperus brevifolius* montrant les différentes structures des tissus dans un échantillon contaminé (50 000 ppm) *(Baruah et al., 2014)*

4.4.4.4. Morphologie

Selon Adam et Duncan (1999), Luhach et Chaudhry (2012), Ogbo (2009) et Sharifi *et al.*, (2007), les effets des produits pétroliers (composés en grande partie d'une grande quantité d'hydrocarbures) dépendent de plusieurs facteurs tels que :

- Le niveau de concentration en contaminant, les niveaux bas de contamination n'ayant des fois pas d'effets significatifs sur les espèces végétales, voire même parfois des effets positifs (stimulation de la croissance) ;
- L'âge de la pollution, un sol contaminé devient moins toxique avec le temps (Fig. 10) ;
- Le type d'espèces (Fig. 11), car certaines espèces sont plus résistantes que d'autres et montrent certaines capacités à croitre dans des milieux contaminés.

Plusieurs études ont montré les effets négatifs des produits pétroliers (Essence, diesel, pétrole brut…) sur la morphologie des espèces végétales. Parmi les paramètres importants pris en compte lors de ces études, nous retrouvons souvent la longueur de la tige, la longueur racinaire, la biomasse des parties aériennes et racinaires (Fig. 12).

L'un des facteurs importants impliqués dans l'inhibition de la croissance des espèces végétales est l'altération du rapport C/N. En effet, la contamination d'un sol par des hydrocarbures enrichit ce dernier en carbone ayant pour effet de stimuler l'activité microbienne, altérant de cette façon les teneurs en azote. La biomasse microbienne mobilise alors l'azote le rendant non disponible pour les plantes, altérant ainsi leur croissance (Gillian Adam et Duncan, 2003).

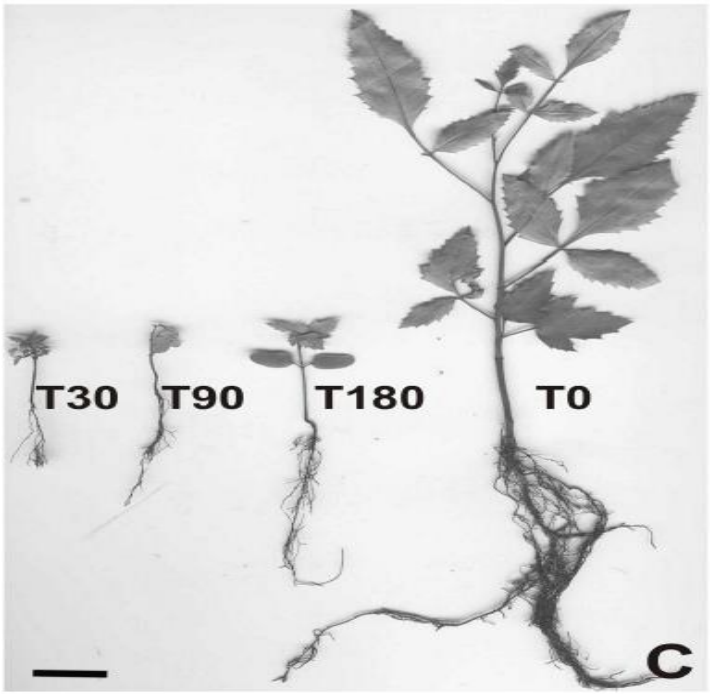


Figure 10. Plantules de *Schinus terebinthifolius*, poussant dans un sol contaminé par du carburant diesel *(Bona et al., 2011)*

Traitements T180 (sol contaminé 180 jours avant la plantation), T90 (sol contaminé 90 jours avant la plantation), T30 (sol contaminé 30 jours avant la plantation) et T0 (sol non contaminé).

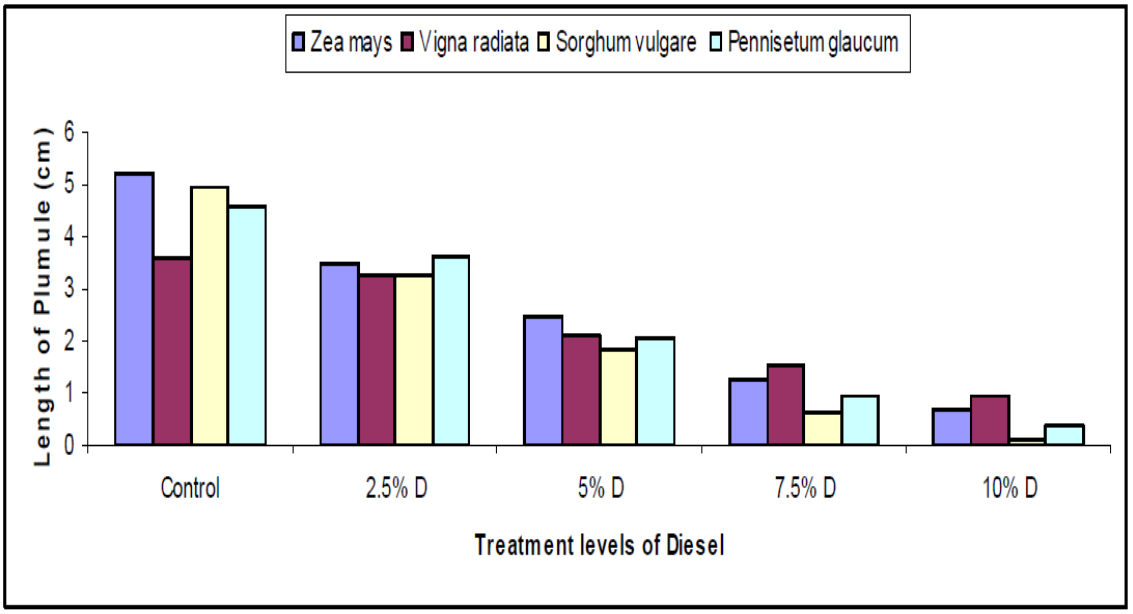


Figure 11. Longueur de la plumule de quatre plantes cultivées en réponse à différents niveaux (%) de contamination par le diesel *(Luhach et Chaudhry, 2012)*

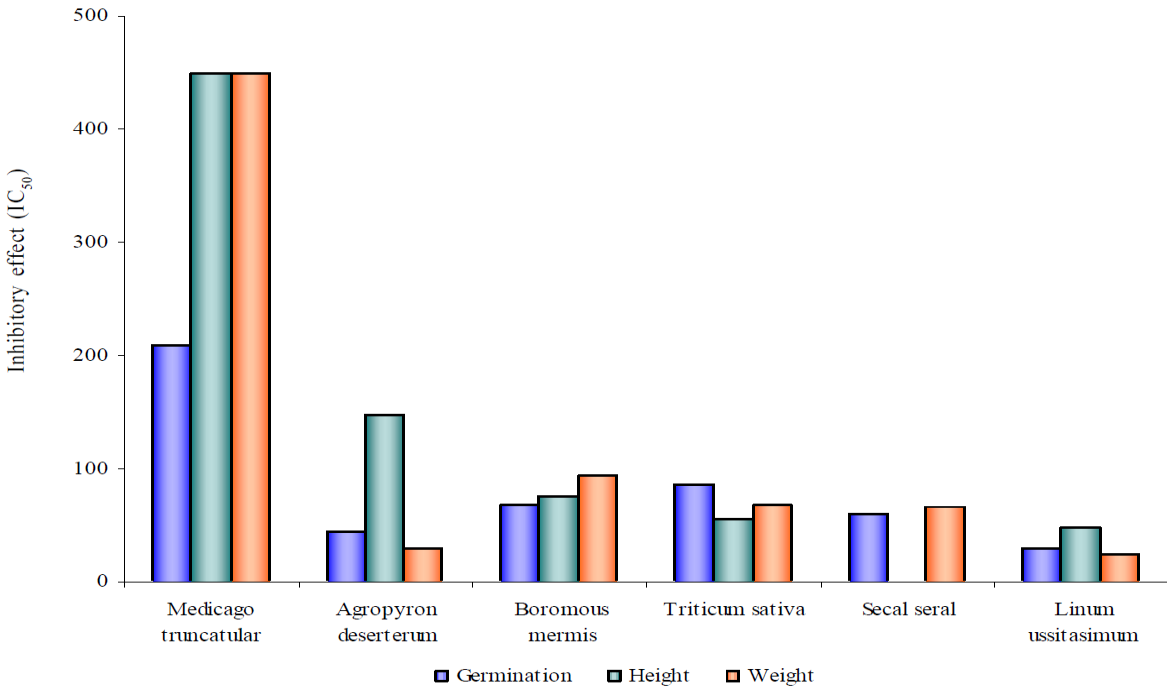


Figure 12. Effets inhibiteurs de sols contaminés par des huiles usagées sur le taux de germination, la hauteur de la plantule et la biomasse aérienne de quelques espèces végétales *(Sharifi et al., 2007)*

Adam et Duncan (1999) ont rapporté que des plantes cultivées dans des sols contaminés au diesel se caractérisent par : la formation de racines adventives (structures racinaires se trouvant dans des positions inhabituelles) sur des plantules d'Alpiste des canaries et une augmentation des racines latérales sur une plantule de lin cultivé. Ils ont mis en place un système expérimental qui a permis de suivre le schéma du développement racinaire de certaines espèces de plantes dans un système de sol-modèle contaminé au diesel. Les observations indiquent que les racines des plantes évitent les zones contaminées par le diesel si elles ont un sol non contaminé pour y croitre. S'il n'y a pas de sol non contaminé disponible, les racines pousseront dans les régions contaminées jusqu'à ce qu'elles trouvent une zone de sol non contaminée. Cependant, à des niveaux de contamination inférieures (jusqu'à 10g de diesel par kg de sol), les racines pénètrent dans la zone contaminée après une période d'acclimatation. Une fois que la majeure partie du sol non contaminé environnant a été utilisée, les racines commencent à se déplacer dans le patch contaminé.

4.4.4.5. Espèces tolérantes et tests de phytotoxicité

Certaines surfaces de plantes sont très sensibles aux produits pétroliers, c'est le cas des feuilles de tomate, tabac, pomme de terre et des solanacées en général, alors que d'autres sont remarquablement tolérantes, comme celles des carottes et des ombellifères en général. L'examen des sols au voisinage des raffineries permet de constater que les espèces telles que la luzerne et le trèfle dominent autour des unités de distillation et des bacs de stockage des produits lourds. Les espèces sont capables, grâce aux bactéries associées à leurs racines, de fixer l'azote atmosphérique de l'air. Au niveau de la flore se retrouve le même phénomène qu'au niveau de la microflore : les espèces capables de fixer l'azote atmosphérique ont un avantage sur les espèces exigeantes en azote organique ou minéral (Bergue et Mérienne, 1986).

Les effets des produits pétroliers sur les organismes vivants diffèrent selon les espèces. Certaines étant plus tolérantes que d'autres. Par exemple, les membres de la famille des Ombellifères (Apiaceae) sont particulièrement tolérants aux huiles légères, tandis que les Graminées (Poaceae) sont intolérantes (Gillian Adam et Duncan, 2002). Ces espèces tolérantes sont recherchées car elles peuvent servir pour la bioremédiation ou encore la bioindication. Ainsi, selon Adam et Duncan (2002), le recours à des systèmes basés sur l'utilisation de plantes pour nettoyer les sols contaminés est devenue un domaine de recherche phare, et il est évident que les plantes qui poussent bien dans des sols contaminés doivent être identifiées et étudiées pour être utilisées dans les technologies de phytoremédiation. D'après Shirdam *et al.*, (2008),

l'évaluation de la capacité des espèces indigènes tolérantes à croître sur des sols pollués par des produits pétroliers est une étape préliminaire importante pour la phytoremédiation.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer les différences observées entre les espèces par rapport à une contamination. Par exemple, l'intégrité et la dureté de l'enveloppe de la graine affectent le taux de pénétration des produits pétroliers, de ce fait il existe des variations entre les espèces (Amakiri et Onofeghara, 1984).

Ci-dessous deux listes d'espèces, la première (tableau 2) représente des espèces avec une capacité de phytoremédiation des hydrocarbures pétroliers démontrée, la deuxième (tableau 3) représente des espèces avec une capacité de tolérance aux hydrocarbures pétroliers démontrée.

Tableau 2. Espèces avec une capacité de phytoremédiation des hydrocarbures pétroliers démontrée *(Frick et al., 1999)*

No.	**Details**
1	Western wheatgrass *(Agropyron smithii)*
2	Big bluestem *(Andropogon gerardi)*
3	Side oats grama *(Bouteloua curtipendula)*
4	Blue grama *(Bouteloua gracilis)*
5	Common buffalograss *(Buchloe dactyloides)*
6	Prairie buffalograss *(Buchloe dactyloides var. Prairie)*
7	Bell rhodesgrass *(Chloris gayana)*
8	Bermuda grass *(Cynodon dactylon L.)*
9	Carrot *(Daucus carota)*
10	Canada wild-rye *(Elymus canadensis)*
11	Tall fescue *(Festuca arundinacea Schreb.)*
12	Arctared red fescue *(Festuca rubra var. Arctared)*
13	Soybean *(Glycine max)*
14	Duckweed *(Lemna gibba)*
15	Annual ryegrass *(Lolium multiflorum)*
16	Ryegrass or perennial ryegrass *(Lolium perenne L.)*
17	Alfalfa *(Medicago sativa L.)*
18	Verde kleingrass *(Panicum coloratum var. Verde)*
19	Switchgrass *(Panicum virgatum)*
20	Bush bean *(Phaseolus vulgaris L.)*
21	Poplar trees *(Populus deltoides x nigra)*
22	Winter rye *(Secale cereale L.)*
23	Little bluestem *(Schizachyrium scoparius)*
24	Indiangrass *(Sorghastrum nutans)*
25	Sorghum *(Sorghum bicolor)* or sudangrass *(Sorghum vulgare L.)*
26	Meyer zoysiagrass *(Zoysia japonica var. Meyer)*
27	Sudangrass *(Sorghum vulgare L.)*

Tableau 3. Espèces avec une capacité de tolérance des hydrocarbures pétroliers démontrée *(Frick et al., 1999)*

No.	Details
1	Crested wheatgrass *(Agropyron desertorum)*
2	Tilesy sage *(Artemisia tilesii)*
3	Oat *(Avena sativa)*
4	Canola *(Brassica rapa)*
5	Water sedge *(Carex aquatilis)*
6	Round sedge *(Carex rotundata)*
7	Rock sedge *(Carex rupestris)*
8	Carrot *(Daucus carota)*
9	Bering hairgrass *(Deschampsia beringensis)*
10	Quackgrass *(Elytrigia repensor Agropyron repens)*
11	Tall cotton-grass *(Eriophorum angustifolium)*
12	Soybean *(Glycine max)*
13	Sunflower *(Helianthus annuus)*
14	Barley *(Hordeum vulgare)*
15	Birdsfoot trefoil *(Lotus corniculatus)*
16	Black medick *(Medicago lupulina)*
17	Alfalfa *(Medicago sativa L.)*
18	*Melilotus altissima*
19	Reed canary grass *(Phalaris arundinacea)*
20	Reed grass *(Phragmites australis)*
21	Jack pine *(Pinus banksiana)*
22	Field pea *(Pisum arvense)*
23	Alpine bluegrass *(Poa alpina)*
24	*Psoralea bituminosa*
25	*Robinia pseudacacia*
26	Arctic willow *(Salix arctica)*
27	Snow willow *(Salix reticulata)*
28	Three-square bulrush *(Scirpus pungens)*
29	*Senecio glaucus*
30	*Spartina alterniflora*
31	*Spartina patens*
32	Alsike clover *(Trifolium hybridum)*
33	Red clover *(Trifolium pratense)*
34	White clover *(Trifolium repens)*
35	Wheat *(Triticum aestivum)*
36	Cattails *(Typha latifolia)*
37	Fababean *(Vicia faba)*
38	*Vicia tetrasperma*
39	Maize *(Zea mays L.)*

D'après Ndimele (2010), la plupart des espèces de ces deux listes sont des graminées (avec un système racinaire fibreux, augmentant la zone de contact avec les polluants) et des

légumineuses (capables de fixer l'azote atmosphérique, qui n'entrent ainsi pas en compétition avec les microorganismes et les autres plantes pour l'azote limité du sol).

Les perturbations d'origine anthropique, telles que les contaminations de sols, pouvaient favoriser l'établissement d'espèces invasives dans un milieu donné (Hierro *et al.,* 2006). Plusieurs auteurs ont suggéré l'utilisation d'espèces invasives pour la phytoremédiation. Singh *et al.,* (2016) et Khalid *et al.,* (2018) ont proposé *Xanthium strumarium* pour la phytoremédiation des métaux, Trueman et Erber (2013) ont proposé *Potamogeton illinoensis* pour la dépollution des produits chimiques perturbateurs du système endocrinien (PED). Pandey (2012) a proposé la plante envahissante *Ipomoea carnea* pour la dépollution des dépôts de cendres volantes. Lu *et al.,* (2010) ont indiqué que *Pistia stratiotes* avait une bonne capacité de dépollution de l'azote et du phosphore.

4.4.4.6. Effets sur les communautés d'invertébrés du sol

Selon Gillet et Ponge (2002), quand un sol est pollué, il s'ensuit une perte de biodiversité se traduisant par des pertes de fonctions. La faune du sol est composée d'organismes divers, plus ou moins tolérants à la pollution. Les communautés d'invertébrés du sol peuvent changer à cause de la pollution de ce sol pour diverses raisons. L'une des raisons évidentes est la sensibilité différentielle des espèces, le comportement spécifique de chaque espèce sous le stress causé par la pollution et sa capacité à la tolérer. La diversité des réponses aux contaminants est déterminée par des processus toxicologiques tels que l'absorption de la substance toxique, la séquestration, la biotransformation et l'excrétion. En conséquence, lorsqu'une communauté est exposée à une substance toxique, les espèces sensibles seront supprimées, ce qui, en soi, provoquera un changement de communauté. Il existe ainsi une différenciation entre les communautés d'invertébrés vivant dans des sols pollués et des sols non pollués. Outre les effets directs, les changements dans les communautés d'invertébrés sont également provoqués par des interactions indirectes, agissant par le biais du réseau trophique ou par des modifications physiques de l'habitat. Des groupes comme les isopodes ou encore les hyménoptères peuvent être positivement affectés par une contamination par des hydrocarbures (Van Straalen, 2004), alors que d'autres groupes le sont négativement. Ainsi, il a été rapporté par Erstfeld et Snow-Ashbrook (1999), que la pollution par les hydrocarbures pouvait diminuer l'abondance et la diversité des communautés de macrofaunes d'un milieu contaminé. Eom *et al.,* (2007) ont testé la toxicité de quelques échantillons de sol provenant d'un ancien site de cokerie pollué par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sur des vers de terre

(*Eisenia fetida*) et des collemboles (*Folsomia candida*). Les résultats ont indiqué de sévères effets sur la survie et la reproduction des deux espèces.

De leur côté, Blakely *et al.*, (2002) ont rapporté de faibles corrélations entre les HAP et certains groupes d'invertébrés dans des sols contaminés par du créosote. Il y a cependant une meilleure corrélation avec des facteurs physiques du sol tel que le carbone, le pH et la conductivité électrique, suggérant que les HAP influent sur les invertébrés du sol non pas par une toxicité directe, mais par un effet sur la structure de l'habitat et la disponibilité de la nourriture.

CHAPITRE II
DESCRIPTION DES SITES D'ETUDE

1. Présentation de la wilaya de Tizi-Ouzou

Nos différentes études ont été réalisées dans différentes stations-services, situées dans deux communes de la wilaya de Tizi-Ouzou (Idjeur et Bouzeguene). Selon l'ANIREF (2013) et l'ANDI (2013), la wilaya de Tizi-Ouzou est située sur le littoral Centre-Est du pays à 110 km de la capitale Alger. La pluviométrie moyenne est entre 600 et 1000 mm par an. Elle dispose d'une façade maritime de 85 km et s'étale sur une superficie de 2958 km² (Fig. 13).

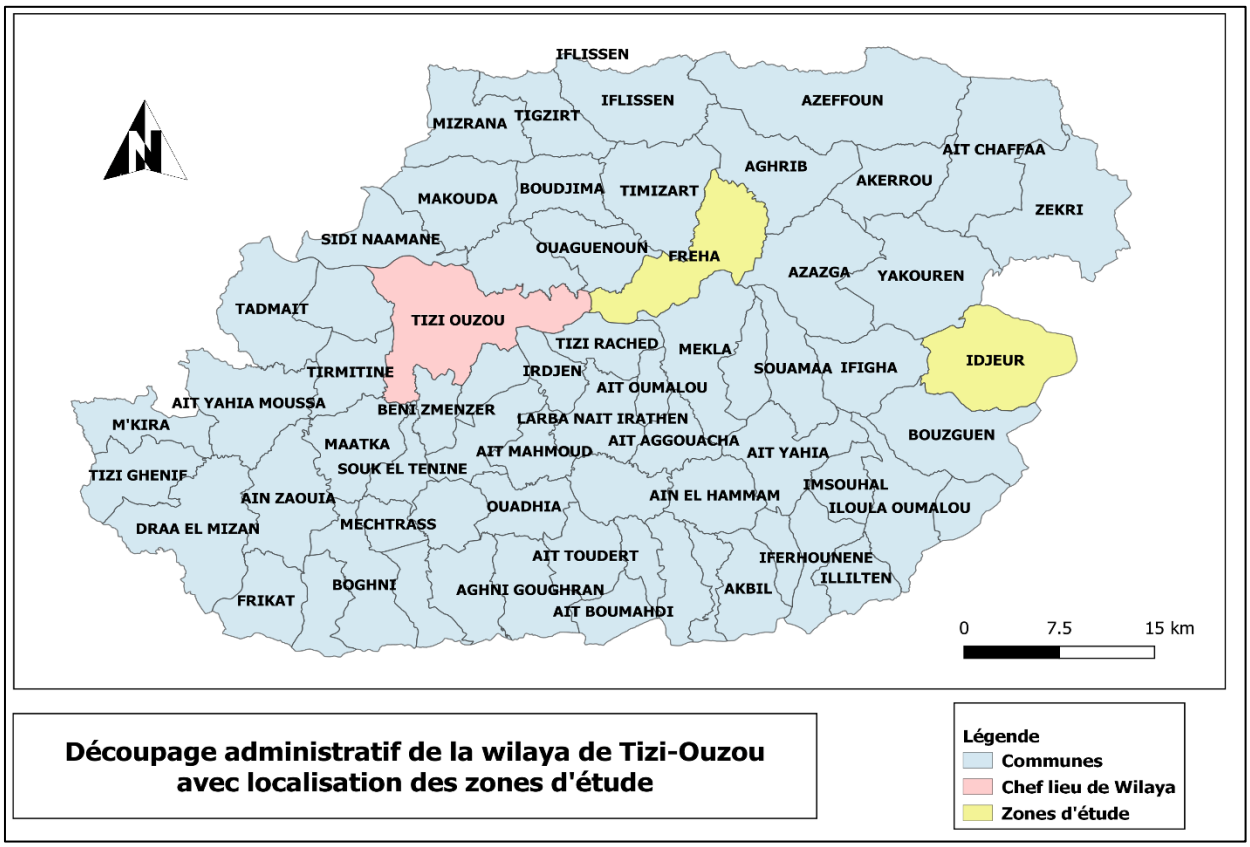


Figure 13. Découpage administratif de la wilaya de Tizi-Ouzou avec localisation des zones d'étude (Originale, 2019)

2. Choix des zones d'études pour l'inventaire

Le choix des zones d'études s'est fait suite à des visites au niveau de plusieurs stations-services. Les critères recherchés au niveau de chaque station-service pour qu'elle soit retenue pour l'étude sont :

- Existence de rejets visibles de produits pétroliers au niveau du site : condition *sine qua non* pour étudier les effets de ces rejets sur le milieu naturel ;
- Présence de végétation à proximité de la station-service : facteur très important pour réaliser l'inventaire de cette végétation ;

- Le site d'étude doit être accessible et le terrain pas très accidenté ;
- La longueur du site doit être au minimum de 10 mètres pour permettre la réalisation d'une étude avec plusieurs zones ;
- Il est important que le site choisi n'ait pas subi d'actions anthropiques importantes qui pourraient fausser les résultats (source de pollution autre que des produits pétroliers, pâturage ou piétinement importants…) ;
- Accord du gérant de la station-service pour la réalisation de l'étude (accord de la direction régionale si station-service étatique et accord du propriétaire si station-service privée).

3. Résultats des visites sur site effectuées au niveau des stations-services

Suite aux prospections effectuée au niveau de 08 stations-services réparties sur plusieurs communes de la wilaya de Tizi-Ouzou, 02 stations-services sont retenues, 01 site d'échantillonnage a été sélectionné près de la station d'Idjeur et 02 sites d'échantillonnage pour la station de Fréha.

4. Description des zones d'études retenues

Trois sites d'études ont été retenus pour mener les investigations, le premier site se situe à proximité de la station-service d'Idjeur, le deuxième site et troisième site se situent à proximité de la station-service de Fréha. Les deux communes de Fréha et Idjeur sont délimitées dans la figure 13 représentant le découpage administratif de la wilaya de Tizi-Ouzou.

4.1.Station-service d'Idjeur

C'est une station-service privée. Elle est située aux frontières des communes d'Idjeur et de Bouzeguene au bord de la route de wilaya N° 251 (Fig. 14). Le site à proximité de la station-service remplissant toutes les exigences nécessaires au bon déroulement de l'étude, il a donc été logiquement retenu en vue de la réalisation de l'étude.

Figure 14. Vue globale du premier site d'étude avec son entourage (Original, 2019)

4.1.1. Description de la commune

Selon les données présentées par le plan directeur d'aménagement et de l'urbanisme (PDAU) (2012), la commune d'Idjeur, est localisée à environ 70km à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Tizi Ouzou et s'étale sur une superficie de 72.06km^2. D'après la direction de la programmation et du suivi budgétaire de la wilaya de Tizi-Ouzou (2019) elle compte 10 509 habitants répartis sur 07 villages. Elle est délimitée par :

- Au Nord-Ouest par la commune de Yakourene ;
- Au Nord-Est par la commune de Adekar (wilaya de Béjaia).;
- A l'Ouest par la commune d'Ifigha ;
- Au Sud par la commune de Bouzeguene ;
- A l'Est par la commune Akfadou (wilaya de Béjaia).

C'est une zone de moyenne montagne, qui est caractérisée par des pentes qui sont relativement moyennes. Le réseau hydrographique de la commune est représenté par des cours d'eau, dont les plus importants (tel qu'Assif Ousserdoune) suivent un sens d'écoulement général d'Est en Ouest. Le patrimoine naturel de la commune est constitué essentiellement de la forêt dense à l'orée du massif d'Akfadou qui occupe 66.80% de la commune. La forêt est dominée par le chêne zen, le chêne Afarès et le chêne liège. Il existe au niveau du village Méhaga une entreprise des travaux forestiers pour l'exploitation forestière en plus de l'extraction du bois de chauffage. Le climat y est rude et contrasté, à la fois méditerranéen et montagnard, avec une période hivernale pluvieuse et neigeuse. Les températures descendent en dessous de 0°C. Quant à la période estivale ; elle est chaude et sèche, tempérée en hauteur par l'effet de l'altitude.

4.1.2. Description de l'environnement immédiat de la station

La station-service d'Idjeur est entouré par la forêt. À ses abords immédiats se trouvent un champ dominé par *Oxalis pes-caprae* à l'Ouest, la route W 251 à l'Est, route W 251 et la forêt au Nord et, enfin, un terrain contaminé par le rejet de la station au Sud. Un cours d'eau se situe après le site contaminé et Assif Ousserdoune se trouve à environ 115 mètres. La localisation du site d'étude est représentée sur la figure 14.

Suite à la visite sur site, il a été constaté ce qui suit :

- Présence de rejets importants à proximité de la station-service ;
- La pollution est imputable à des produits pétroliers ;

- Présence d'une végétation dans le site pollué ;
- Site accessible et assez étendu ;
- Le site n'est pas perturbé par des activités comme le pâturage et le risque de piétinement n'est pas important ;
- Le gérant a donné son accord pour le déroulement de l'étude.

4.2. Station-service de Fréha

Il s'agit d'une station-service privée située dans la commune de Fréha au bord de la route nationale N° 12. Le site prospecté (Fig. 15) remplissant toutes les exigences et suite à l'observation de 03 sources principales de rejet de produits pétroliers à partir de la station, il a donc été décidé de retenir 02 sites d'études à proximité de la station.

4.2.1. Présentation de la commune de Fréha

Selon les données présentées par le plan directeur d'aménagement et de l'urbanisme (PDAU) (2011), la commune de Fréha est située à environ 30 km du chef-lieu de la wilaya. Elle s'étend sur une superficie de 68,55km^2. D'après la direction de la programmation et du suivi budgétaire de la wilaya de Tizi-Ouzou (2019) sa population s'élève à 26 763 habitants. Elle est délimitée par :

- Nord et Nord-Est : Communes d'Aghribs et de Timizart ;
- Est : Commune d'Azazga ;
- Ouest et Sud-Ouest : Communes d'Ouaguenoun et de Timizart ;
- Sud et Sud–Est : Communes de Mekla et l'oued Sebaou.

Elle est située, en partie, sur le bassin versant Sud de la chaîne côtière. L'altitude moyenne de la commune est de 350m. La topographie de la commune alterne entre un relief de colline avec une altitude moyenne de 350 mètres et une topographie de plaines le long de l'Oued Sebaou et de l'Oued Diss. Les activités au sein de ces zones sont l'élevage et l'arboriculture, essentiellement l'olivier. Le climat de la commune est méditerranéen de type continental avec des hivers très froids (température inférieure à 10°C) et des étés très chauds (température supérieure à 35°C).

4.2.2. Description de l'environnement immédiat de la station

Aux abords immédiats de la station-service de Fréha se trouvent les sites d'études et un champ dominé notamment par l'avoine à l'Ouest, la RN 12 à l'Est, un cours d'eau au Nord et un chantier de construction au Sud. Du côté Est de la RN12, se trouvent diverses constructions à caractère commerciale, industriel et des habitations. L'Oued Sébaou se situe à environ 470 mètres à l'Ouest de la station (Fig. 15). La localisation des deux sites d'étude est représentée sur la figure 15.

Suite à la visite sur site il a été constaté ce qui suit :

- Présence de rejets importants à proximité de la station-service ;
- Présence de plusieurs sources de rejet (03 sources majeures) sur le long de l'extrémité de la station ;
- La pollution est imputable à des produits pétroliers ;
- Présence d'une végétation dans le site pollué ;
- Site accessible et d'une surface très étendue ;
- Le site n'est pas perturbé par le pâturage. Il existe des risques de piétinement et de fauchage de la végétation au début de l'été. Cependant, le fauchage ne concerne pas la végétation à proximité immédiate de la station et, de plus, l'inventaire de la végétation peut être effectué bien avant cette période ;
- Le gérant a donné son accord pour le déroulement de l'étude.

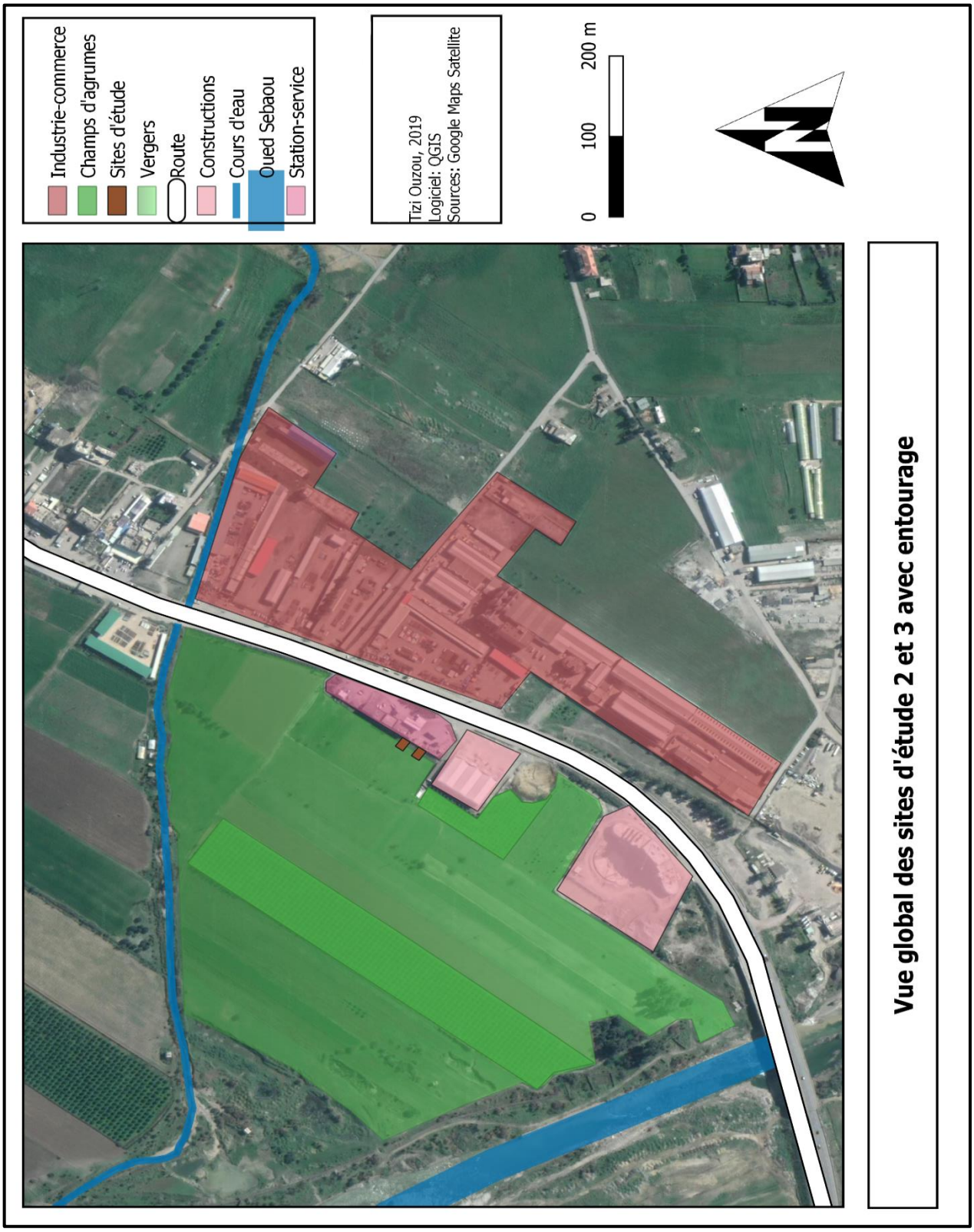


Figure 15. Vue globale des sites d'études 2 et 3 avec leur entourage (Original, 2019)

CHAPITRE III
MATERIEL ET METHODES

1. Etude du réseau de distribution de carburant au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou

Le but de cette étude est d'avoir une meilleure compréhension du réseau de distribution des carburants à Tizi-Ouzou et de localiser de potentiels sources de contamination par les hydrocarbures dans la région. Pour cela, nous avons analysé le réseau de distribution des carburants au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou, en utilisant des données récoltées au niveau de la direction régionale de Naftal (entreprise pétrolière algérienne de distribution de carburant). Deux types d'analyses ont été menés : une analyse des quantités et types de carburants mis en jeu au sein de la wilaya et une analyse spatiale du réseau de distribution à l'aide d'un logiciel de système d'information géographique.

1.1. Récolte des données

Des données ont été récoltées au niveau de la direction régionale de Naftal (Tizi-Ouzou) sur la distribution des carburants à l'échelle de la wilaya. Cela concerne les quantités et les types de produits pétroliers distribués ainsi que les infrastructures qui les distribuent avec une liste des stations-services de la région et leur positionnement.

1.2. Analyse du secteur de distribution des produits pétroliers à Tizi-Ouzou

Grâce aux données fournies par Naftal, nous avons pu situer le secteur de distribution des produits pétroliers à Tizi-Ouzou.

1.3. Analyse spatiale

Le logiciel de système d'information géographique (SIG) QGIS a été utilisé pour les analyses spatiales. Nous avons en premier lieu, positionné les stations-services sur la carte de la wilaya de Tizi-Ouzou par importation d'un fichier Excel contenant les coordonnées géographiques des stations-services dans le logiciel QGIS. Opération qui donne comme résultat un semis de points représentant la dispersion des stations-services sur le territoire de la wilaya de Tizi-Ouzou. Le centre moyen nous donne la tendance centrale du semis de points. Ce dernier est couplé à la distance de Bachi qui représente la dispersion des points (représentants les stations-services) par rapport à la tendance centrale.

L'ellipse standard nous permet de voir si la distribution des points est allongée, elle nous renseigne donc sur les directions privilégiées de la dispersion du semis de points. Enfin, les polygones de Thiessen partitionnent l'espace à partir d'un semis de points, donnant de cette manière la zone d'appartenance de proximité de chacun des points. Ainsi, des polygones réduits

et concentrés dans une zone donnée nous renseignent sur une importante concentration de stations-services (Cauvin et Rimbert, 1976, in Hiegel, 1999).

1.3.1. Le centre moyen avec la distance de Bachi

Ces deux analyses ont été effectuées à l'aide des outils de " Coordonnées moyennes " et " Spatial point pattern analysis " du logiciel QGIS.

1.3.2. Ellipse standard

Cette analyse a été effectuée à l'aide de l'outil " Standard deviational ellipse " du logiciel QGIS.

1.3.3. Polygone de Thiessen

Cette analyse a été effectuée à l'aide de l'outil " Diagramme de Voronoï " du logiciel QGIS.

2. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la végétation

Nous avons réalisé une investigation sur les effets des rejets de produits pétroliers sur la végétation à proximité des stations-services. Un inventaire de la végétation se basant sur un gradient de pollution par les produits pétroliers a été effectué. Les espèces végétales présentes ont été identifiées et divers indices écologiques sont calculés.

2.1. Plan expérimental

Sur la base de la structure de la végétation, il a été possible d'identifier quatre gradients de végétation supposés être liés à la contamination. Deux transects (transect 1 et transect 2) ont été établis à partir du point de rejet (faible couvert végétal) à une zone éloignée supposée non polluée (important couvert végétal).

Quatre zones ont été délimitées pour chaque transect. La première zone est située près du point de rejet (zone supposée la plus polluée) et la quatrième zone dans la zone non polluée (zone la plus éloignée du point de rejet). Ce plan d'expérimentation a été utilisé pour l'échantillonnage du sol, de la végétation et des invertébrés (Fig. 16, 17 et 18).

Figure 16. Plan expérimental au niveau du site d'étude 01

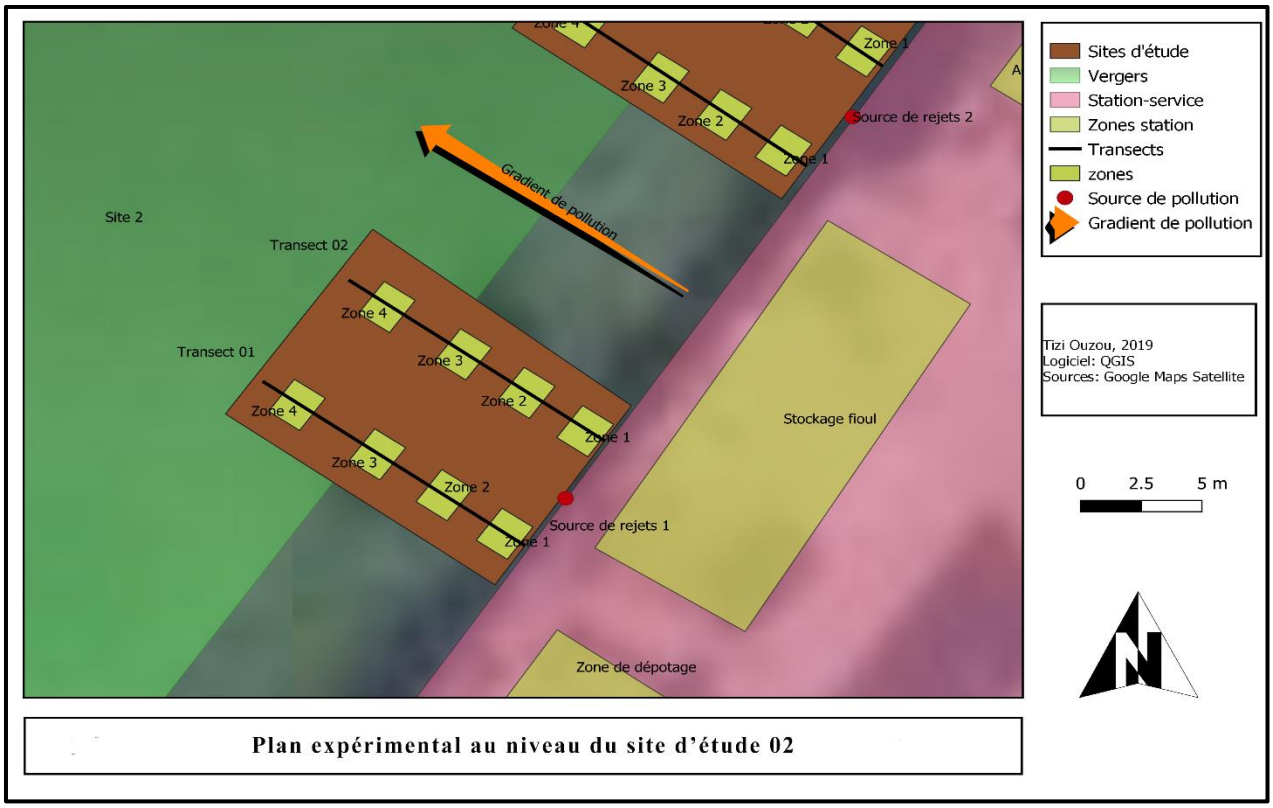


Figure 17. Plan expérimental au niveau du site d'étude 02

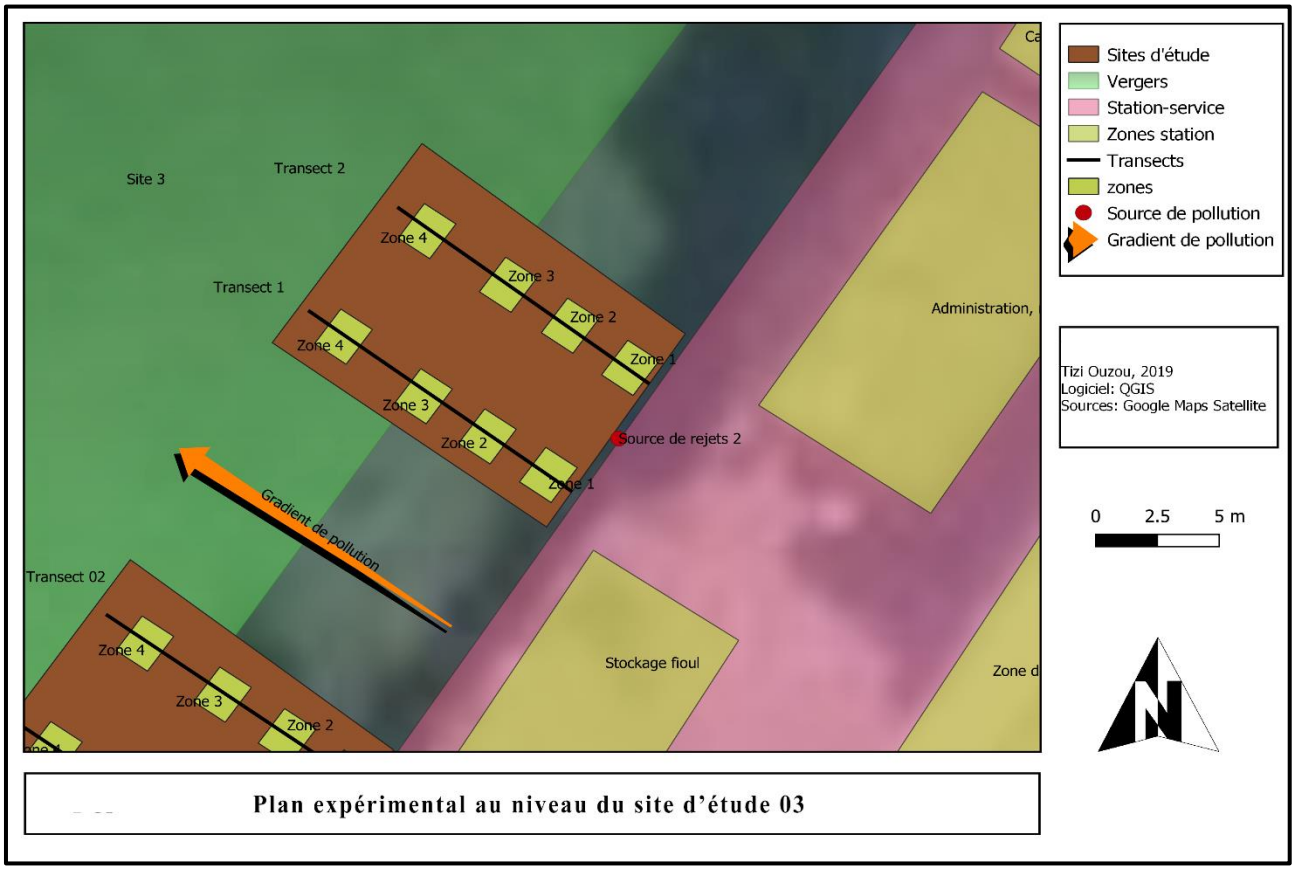


Figure 18. Plan expérimental au niveau du site d'étude 03

2.2. Analyses physico-chimiques du sol

L'échantillonnage de sol a été effectué en mai 2018. Pour chaque zone, des échantillons de sol ont été recueillis à une profondeur de 20cm, placés dans des sacs en plastique et conservés à 4° C avant d'être analysés.

Les analyses physico-chimiques ont porté sur la composition granulométrique, le pH, la conductivité électrique, l'azote (N) total Kjeldahl, le carbone (C) selon la méthode d'Anne et l'humidité. Ces analyses ont été réalisées à l'institut national de recherche forestière (INRF) à Alger.

2.2.1. Granulométrie

Elle exprime la teneur en argile, limon fin, limon grossier, sable fin et sable grossier dans le sol. L'analyse granulométrique est réalisée par dispersion des argiles par l'hexamétaphosphate de sodium. Ensuite, les argiles et limons fins sont prélevés par la pipette de Robinson et les limons grossiers et sables sont obtenus par tamisage (Delaune *et al.*, 1991). La texture est obtenue grâce au triangle des textures (Fig. 19).

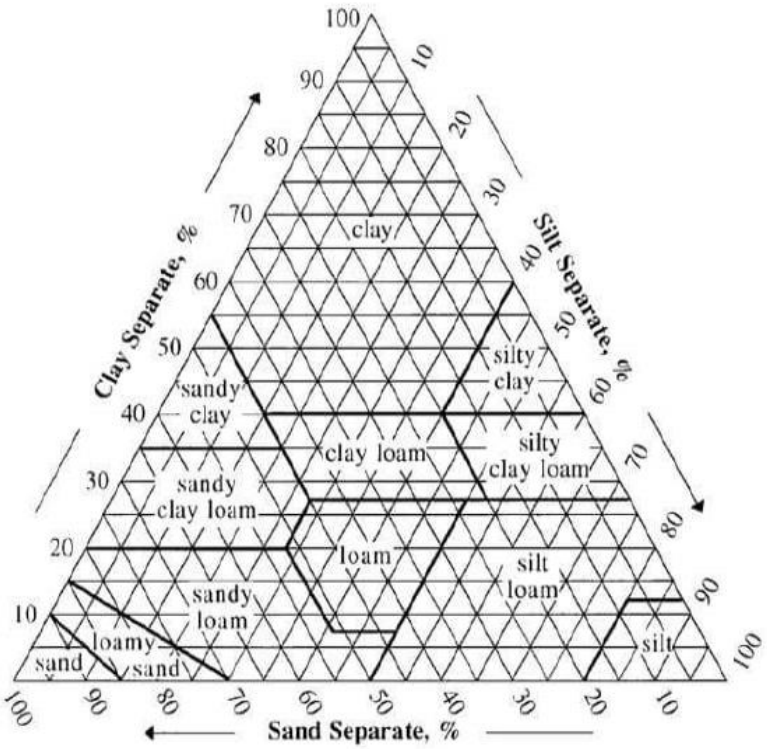


Figure 19. Triangle des textures *(USDA, 2019)*

2.2.2. Humidité

L'humidité est déterminée par la différence entre le poids humide et le poids sec d'un échantillon de terre. L'échantillon est mis à l'étuve à 105°C jusqu'à obtention d'un poids constant, généralement après 24h (Pétard, 1993).

$$Humidité = \frac{(masse\ du\ contenant + masse\ du\ sol\ humide) - (masse\ du\ contenant + masse\ du\ sol\ sec)}{(masse\ du\ contenant + masse\ du\ sol\ sec) - (masse\ du\ contenant)} \text{ X } 100$$

2.2.3. pH

La méthode de mesure du pH consiste à mélanger 20g de sol à 50ml d'eau distillée et à procéder à une agitation de la solution pendant 9min, puis on procède à une lecture avec un pH-mètre (Pétard, 1993).

2.2.4. Conductivité électrique (CE)

Pour déterminer la CE d'un sol, on prend 20g de terre séchée dans 100ml d'eau distillée. On procède à une agitation pendant 30min. La solution est ensuite filtrée et la mesure de la CE se fait par un conductimètre sur le filtrat obtenu (ISO, 1994).

2.2.5. Azote Kjeldahl

La détermination de l'azote par la méthode de Kjeldahl s'effectue par la minéralisation de l'échantillon en milieu acide (la matière organique azotée se retrouve sous la forme de sel d'ammonium). Après la distillation de l'ammonium en ammoniac en milieu alcalin, on effectue le dosage du NH_4OH condensé (Rouiller *et al.*, 1994).

2.2.6. Carbone

Le carbone organique est déterminé par la méthode d'Anne (méthode à chaud). Cette méthode consiste à oxyder le carbone par une solution de bichromate de potassium (10ml) en milieu sulfurique (15ml). Le dosage est réalisé sur la quantité de bichromate qui ne réagit pas au sulfate ferreux (sel de mohr). Ce dosage permet donc de calculer la quantité de bichromate neutralisée par le carbone organique (Rouiller *et al.*, 1994).

2.2.7. TPH (Hydrocarbures Pétroliers Totaux)

Les analyses des TPH n'ont été effectuées que pour le site 3 en raison du nombre limité d'échantillons. Du papier teste qualitatif Macherey Nagel a été utilisé pour déterminer les zones

polluées et non polluées sur les transects des sites 1 et 2. Au contact d'hydrocarbures, ce papier teste de couleur bleu pâle prend une couleur bleu foncé.

Les analyses des TPH (réalisées au laboratoire de synthèse pétrochimique de l'université de Boumerdès) ont été mesurées par la méthode de spectroscopie Mid-laser suivant la norme ASTM D 7678. La mesure se fait par absorption IR dans le spectre 1370cm^{-1} à 1380cm^{-1} (7.25 µm à 7.30 µm) avec un spectromètre laser IR-moyen.

2.3. Echantillonnage de la végétation

Quatre échantillonnages ont été réalisés (en novembre, janvier, mars et mai) 2017 à 2018. En se basant sur la méthode d'échantillonnage de Dazy *et al.*, (2009). Pour chaque zone de chaque transect, nous avons délimité un quadrat de 50 x 50cm dans lequel nous avons effectué l'inventaire de la végétation et l'estimation de l'abondance-dominance des espèces de plantes selon la méthode développée par Braun-Blanquet *et al.*, (1932).

Échelle d'abondance-dominance de Braun-Blanquet *et al.*, (1932) :
+: recouvrement < 5% peu d'individus ;
1: recouvrement < 5% individus nombreux ;
2: recouvrement 5-25% ;
3: recouvrement 25-50% ;
4: recouvrement 50-75% ;
5: recouvrement 75-100%.
Le recouvrement est l'aire occupée par les individus d'une espèce.

La richesse en espèces (S) et l'abondance totale (N) dans chaque zone ont été estimées. Dans chaque zone, il a été comptabilisé le nombre d'individus pour chaque espèce.

La diversité de Shannon-Weaver (H'), l'équitabilité de Pielou (J) et le coefficient de Sorensen-Dice (DSC) ont été calculés selon Shannon et Weaver (1964), Pielou (1966), Sørensen (1948) et Dice (1945). Les formules de calculs sont indiquées ci-dessous.

Calcul de l'indice H'

$$H' = -\sum pi \log 2\, pi$$

Où pi est l'abondance relative de chaque groupe d'organismes

Calcul de l'indice J'

$$J' = \frac{H'}{H'max}$$

Calcul de l'indice DSC

$$DSC = \frac{2c}{a+b}\ x\ 100$$

a : nombre de groupes de la première zone

b : nombre de groupes de la deuxième zone

c : nombre de groupes communs aux deux zones

2.4. Analyse des données

L'ANOVA et le test de Newman-Keuls ont été appliqués pour avoir les différences significatives ($p<0,05$). La méthode de corrélation linéaire de Pearson a été utilisée pour étudier les relations entre les propriétés du sol et les indices écologiques. Tous les tests ont été réalisés sous le logiciel Statistica 7.1 (© StatSoft).

3. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la faune

Les effets des rejets des stations-services sur la faune du sol ont été étudié et un inventaire de la faune a été réalisé (de 2018 à 2019) suivant un schéma expérimental basé sur un principe identique à celui de l'échantillonnage de la végétation. Nous avons identifié les individus invertébrés jusqu'au niveau de l'ordre. Des indices écologiques ont été aussi calculés.

3.1. Méthodes d'échantillonnage

L'échantillonnage des invertébrés dans le sol a été effectué par deux méthodes (Pots Barber et Méthode d'extraction du sol), ce qui permet de collecter des organismes plus diversifiés qu'en utilisant une seule méthode. L'échantillonnage s'est fait au niveau du site 03 (dans la station-service de Fréha). Nous avons utilisé un plan expérimental similaire à celui de la végétation.

3.1.1. Méthode de piégeage par Pots Barber

Nous avons utilisé des pots Barber (Fig. 20) pendant dix jours en août, puis une deuxième fois en avril. Nous avons utilisé des pots en plastique de 9cm de diamètre et de 17cm de hauteur. Dans chaque zone des deux transects, un pot Barber a été rempli au tiers de sa capacité d'eau, saturée de sel (Sel alimentaire, NaCl 98%) et additionnée d'une petite quantité de détergent liquide (liquide vaisselle). Les pots Barber sont vérifiés tous les deux jours (cinq collectes en août et 4 en avril). Les individus piégés sont placés dans des bouteilles en plastique contenant de l'alcool à 70°.

3.1.2. Extraction du sol

Le travail a été effectué durant le mois d'avril. Après avoir extrait les invertébrés présents dans la litière, à la surface du sol, sur un carré de 25 X 25cm. Un bloc de terre de 25cm de côté et 20cm de profondeur est extrait du sol. Le bloc de sol est manipulé à la main pour extraire tous les invertébrés présents qui sont ensuite conservés dans de l'alcool à 70% avant d'être triés et dénombrés au laboratoire (Fig. 21). Ce protocole est basé sur la méthode de Dangerfield (1997), avec une modification des dimensions du bloc de sol extrait.

3.2. Exploitation et analyse des données

Les invertébrés ont été identifiés jusqu'au taxon de l'ordre. Le nombre d'ordres a été estimé pour chaque zone. La diversité de Shannon-Weaver (H'), l'équitabilité de Pielou (J) et le coefficient de Sørensen-Dice (DSC) ont été calculés. L'ANOVA couplée au test de Newman-

Keuls ont été utilisé pour faire apparaitre les différences significatives ($p<0,05$). Les tests ont été réalisés sous le logiciel Statistica 7.1 (© StatSoft).

Figure 20. Echantillonnage de la faune du sol par les pots Barber
A : Pot Barber ; B : Boîtes de conservation des individus avec alcool

Figure 21. Echantillonnage de la faune du sol par extraction du sol

4. Essais de phytotoxicité au niveau du laboratoire

Dans cette étude, nous avons effectué des tests de phytotoxicité, impliquant du carburant diesel comme polluant et diverses espèces remarquées lors de l'inventaire de la végétation. Le but de ces tests est de comprendre les effets des hydrocarbures sur la morphologie des espèces végétales et d'évaluer la tolérance de ces espèces face aux hydrocarbures. Le contaminant utilisé est le diesel acheté dans une station-service à Tizi-Ouzou.

4.1. Premier essai de phytotoxicité

4.1.1. Espèce étudiée

Pour ce premier essai, *Xanthium strumarium* a été sélectionnée pour étudier sa capacité à germer et à croitre dans des sols contaminés par du carburant diesel. Une centaine de capsules (fruits) murs de *X. struamrium* ont été récoltées à Fréha (Tizi-Ouzou) durant le mois d'octobre, dans une zone non contaminée située à environ 200 mètres de la station-service de Fréha. La récolte s'est faite directement sur des individus de *X. strumarium*.

4.1.2. Substrat utilisé

Du terreau de marque «Greenyard Horticulture potting soil» a été utilisé comme substrat. Il est composé de 75% de tourbe noire et de 25% de tourbe blonde. Les propriétés du terreau sont les suivantes : matière sèche : 25%, matières organiques : 18%, pH : 5,5, conductivité électrique : 550 µs/cm, engrais à base de N-P-K 12-14-24 avec des oligo-éléments : 1 kg/m³, Chaux magnésienne : 5,2 kg/m³.

4.1.3. Plan expérimental

Quinze pots en plastique ont été utilisés. L'expérimentation a consisté en quatre traitements avec du diesel et un contrôle. Trois répétitions ont été réalisées pour tous les essais (Fig. 22). Quatre contaminations au diesel ont été réalisées de 2,5, 5, 7,5 et 10g de diesel dans 100g de substrat chacune, le choix de ces doses s'est basé notamment sur des travaux antérieurs, tel que Luhach et Chaudhry (2012). Le diesel a été préalablement mélangé à de l'acétone pour assurer une distribution homogène dans le sol. L'acétone s'évapore par la suite. Le témoin (0g de diesel) est constitué par le substrat seul. L'expérience est en milieu non contrôlé.

Dix capsules de *X. strumarium* ont été semés à température ambiante (24±2°C), dans chaque pot et arrosés avec de l'eau distillée au besoin. Nous avons semé les capsules directement, en

raison de la difficulté à extraire les graines stockées à l'intérieur et pour éviter de les endommager.

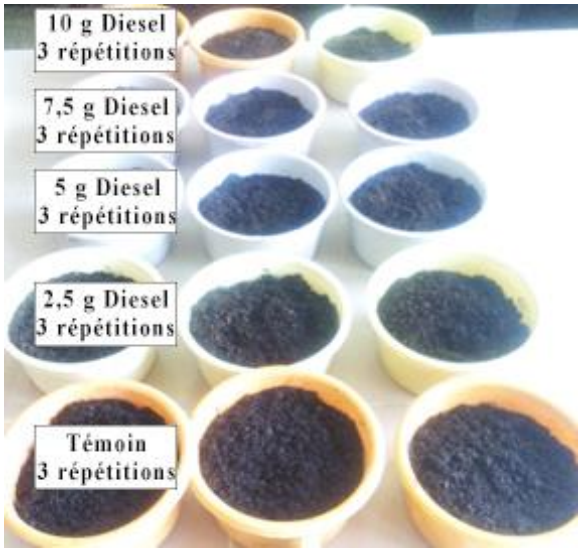


Figure 22. Essai de phytotoxicité du diesel sur *X. strumarium*

4.1.4. Suivi de l'expérience

La germination des graines a été enregistrée à 6, 11 et 14 jours après semis. Le pourcentage cumulé de germination montrant l'évolution de la germination en fonction du temps et le pourcentage total (enregistré 14 jours après semis) ont été estimés. Les longueurs des tiges et des racines ont été enregistrées après 14 jours. Le coefficient de vélocité de germination (CVG) a été calculé selon Al-Mudaris (1998), paramètre qui révèle la rapidité de la germination.

$$CVG = \frac{N1 + N2 + \cdots + Ni}{100} \times (N1T1 + \cdots + NiTi)$$

N = le nombre de graines germées pour chaque jour
T = le nombre de jours à partir du semis correspondant à N

L'EC50 (concentration effective 50%) a été calculée avec l'outil en ligne Quest Graph™ ED50 Calculator (AAT Bioquest, 2018).

4.2. Deuxième test de phytotoxicité

Pour ce deuxième test, 4 espèces ont été utilisées (*Xanthium strumarium, Avena sativa, Daucus carota et Cerinthe major*). Nous avons aussi utilisé 4 types de substrats (Gro Green, Chiraz, Sicoflore et terreau universel). Le but étant de comparer la tolérance au diesel et au changement des conditions du sol du *X. strumarium* par rapport aux autres espèces.

4.2.1. Présentation des espèces végétales utilisées

4.2.1.1. Xanthium strumarium

X. strumarium (Fig. 23), appelée aussi Lampourde Glouteron, est une plante cosmopolite annuelle appartenant à la famille des Asteraceae. Elle est répandue dans les régions tempérées et subtropicales (Khalid et al., 2018; Löve & Dansereau, 1959). C'est une plante médicinale utilisée dans le traitement de diverses maladies (Kamboj & Saluja, 2010). Un glycoside, carboxyatractyloside, hautement toxique a été isolé à partir de la plante (Khare, 2007). C'est une halophyte, pseudometallophyte, avec une grande capacité d'accumulation de certains métaux au niveau de ces feuilles (Khalid et al., 2018; Pan et al., 2019). Elle peut atteindre 150cm de hauteur et croitre dans des habitats variés, incluant les décharges (Weaver et Lechowicz, 1983) et des conditions de sol très diverses (Löve et Dansereau, 1959). Les graines de cette espèce sont substantielles et ses plantules ont une très bonne capacité de croissance, faisant d'elle, une espèce très agressive et compétitive (Kaul, 1971). Cette espèce a déjà été proposé pour la phytoremédiation de plusieurs métaux (Eren, 2019; Khalid et al., 2018; Singh et al., 2016).

Figure 23. Individu de *Xanthium strumarium* (Original, 2018)

4.2.1.2. Avena sativa

L'avoine cultivée (Fig. 24) est une plante annuelle, appartenant à la famille des Poaceae. C'est une monocotylédone, à chaumes solitaires ou en touffes, dressés, de 40 à 180cm de haut, non ramifiés. Cette espèce est cultivée comme culture céréalière dans les régions tempérées nord du monde, ainsi que comme culture fourragère (Mai, 2006). L'avoine est plus adaptée à divers types de sols et réussie mieux sur des sols acides que d'autres cultures de céréales à petites graines. Elle est surtout cultivée dans des climats frais et humides et peut montrer une sensibilité au temps sec et chaud (Ahmad et al., 2014). Elle est plus sensible à la salinité que d'autres céréales telles que l'orge et le blé (Sapre et al., 2018).

Figure 24. Individus d'*Avena sativa (Sendelbach, 2005)*

4.2.1.3.Daucus carota

Daucus carota (Fig. 25) appartient à la famille des ombellifères. Elle peut atteindre une taille de 50 à 120cm. Son habitat couvre les pentes de montagne, les zones rudérales, les bords de route, les zones de déchets, les champs, les bordures de champs et les zones humides. La carotte sauvage forme toujours des touffes denses, des populations prédominantes ou des monocultures même dans des sols pauvres en nutriments. Elle est considérée comme une espèce envahissante dans de nombreux pays et régions du monde. Son fruit est utilisé pour la médecine et l'huile (Xu et Chang, 2017).

Figure 25. Individu de *Daucus carota* *(Povey, 2007)*

4.2.1.4. Cerinthe major

Cerinthe major (Fig. 26) est une plante herbacée annuelle à tige dressée et ramifiée, ayant une hauteur comprise entre 15 et 80 cm, elle est largement répandue dans les pays méditerranéens. Le genre *Cerinthe* L. est un petit genre de la famille des Boraginaceae. Il a une répartition circumméditerranéenne allant de la région atlantique du Maroc à la partie Ouest de la région irano-turanienne. Le genre est caractérisé par des sépales séparés, une corolle tubulaire et le fruit schizocarpique qui se divise en deux parties à maturité. On la retrouve dans les champs, prairies, terres cultivées et lieux humides. Elle est connue pour ses propriétés médicinales («Guide illustré de la flore algérienne», 2012; Nocentini et al., 2012; Selvi et al., 2009).

Figure 26. Individu de *Cerinthe major* *(Bernier, 2006)*

4.2.2. Présentation des substrats utilisés

4.2.2.1. Le terreau universel

C'est un terreau avec engrais minéral d'importation (tableau 4). Il est adapté pour la culture des plantes à massif, arbres fruitiers, d'ornement… à l'exception des plantes qui exigent une terre de bruyère. Il convient aussi pour toutes les utilisations : rempotage, repiquage, plantation et terreautage. Ce terreau est prêt à l'emploi, il est composé de tourbes enrichies d'écorces finement compostées et de fumiers. C'est un milieu moelleux, aéré et équilibré.

Tableau 4. Composition du terreau universel

Composition	Tourbe blonde et brune, écorce compostée, fumiers
Dosage	1.7 kg/m^3 d'engrais NPK 14-14-14
Matière sèche/produit brut	30%
Matière organique/matière sèche	60%
pH	6.5
Conductivité	40 mS/m

4.2.2.2. Le chiraz

La briquette de Chiraz est composée de déchets de fibres de coco compressés. C'est un produit biologique, 100% organique, considéré comme une alternative très valable aux tourbes et aux substrats inorganiques. Le Chiraz a une excellente capacité de rétention d'eaux et une bonne porosité d'air (10%). Il montre un rapport carbone/azote (C/N) élevé résultant d'une forte résistance à la décomposition biologique et chimique et une durée de vie longue.

4.2.2.3. Le Go green

Il s'agit d'un substrat très riche en éléments minéraux. C'est du terreau de rempotage pour tout usage de première qualité comprenant un mélange spécial d'humus de tourbe, de fumier composté et de perlite. Il est recommandé et utilisé pour les serres commerciales et les jardiniers pour l'obtention d'une croissance robuste et rapide des plantes. Il est idéal pour l'utilisation d'une grande variété de plantes en pot.

4.2.2.4. Le sicoflore

C'est un substrat pour jeunes plantes, constitué d'un mélange de tourbes de hauts marais du Nord de l'Allemagne. Par la composition des éléments nutritifs qui sont ajoutés, ce substrat est

particulièrement approprié à la culture des jeunes plantes. Il peut être utilisé par toutes les machines de rempotage ou à mottes.

Autres substrats utilisés : Sable, terre du jardin (sol argileux) et billes d'argile.

La terre du jardin est étalée à l'air libre pour subir un séchage naturel, puis elles sont tamisées avec un tamis de 2mm.

4.2.3. Composition des substrats utilisés

Nous avons mélangé les 4 substrats (Chiraz, terreau universel, sicoflore et go green) avec du sable et de la terre du jardin avec des proportions de 1/3 chacun et, à cela, s'ajoute une couche de billes d'argile au fond des pots.

- Substrat 1 : billes d'argile+1/3 de sable +1/3 de terre du jardin + 1/3 de Chiraz
- Substrat 2 : billes d'argile+1/3 de sable +1/3 de terre du jardin + 1/3 de Terreau universel
- Substrat 3 : billes d'argile+1/3 de sable +1/3 de terre du jardin + 1/3 de Gro green
- Substrat 4 : billes d'argile+1/3 de sable +1/3 de terre du jardin + 1/3 Sicoflore

4.2.4. Contamination des substrats

Les substrats préparés sont pollués à différentes concentrations du diesel (2,5% et 5%). Nous avons utilisé la méthode m/m (masse/masse) pour préparer les diverses contaminations.

Niveau de contamination de 2,5% : 7,5g de diesel + 292,5g de substrat.

Niveau de contamination de 5% : 15g de diesel + 285g de substrat.

Le diesel a été mélangé avec de l'acétone pour assurer une distribution homogène dans le sol, l'acétone s'évapore par la suite. Le contrôle (0g de diesel) est constitué de substrat seul.

4.2.5. Semis

Pour chaque espèce, dix graines sont plantées dans chaque pot, et deux répétitions sont faites pour chaque niveau de contamination ainsi que le témoin (Fig. 27). Un arrosage a été effectué par la suite. L'expérience a été conduite en serre à une température de 25±2°C.

Figure 27. Essais de phytotoxicité du diesel sur les différentes espèces végétales

4.2.6. Suivi de l'expérience

La germination des graines a été enregistrée régulièrement pour avoir le pourcentage cumulé de la germination. Le pourcentage total est enregistré 23 jours après le semis. Les longueurs des tiges et des racines sont mesurées après 23 jours.

4.3. Analyses statistiques

L'ANOVA et le test post-hoc de Newman-Keul ont été utilisées pour faire apparaitre les différences significatives ($p<0,05$) à travers les différents niveaux de contamination. Tous les tests ont été effectués avec le logiciel Statistica 7.1 (©StatSoft).

CHAPITRE IV
RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats

1. Etude du réseau de distribution de carburant au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou

1.1. Analyse du secteur de distribution des produits pétroliers à Tizi-Ouzou

1.1.1. Profil du réseau de distribution des produits pétroliers de Naftal à Tizi-Ouou

A Tizi-Ouzou, il existe quatre différentes sortes de stations-services :

- Stations à gestion directe (GD) ;
- Points de vente agréés (PVA) ;
- Revendeurs ordinaires (RO) ;
- Stations en gérance libre (GL).

Les points de vente agréés sont les plus représentés avec 61 stations-services, suivis par les stations à gestion directe (14 stations). Les revendeurs ordinaires et les stations en gérance libre sont de petites stations qu'on retrouve respectivement au nombre de 09 et 02 stations (Fig. 28).

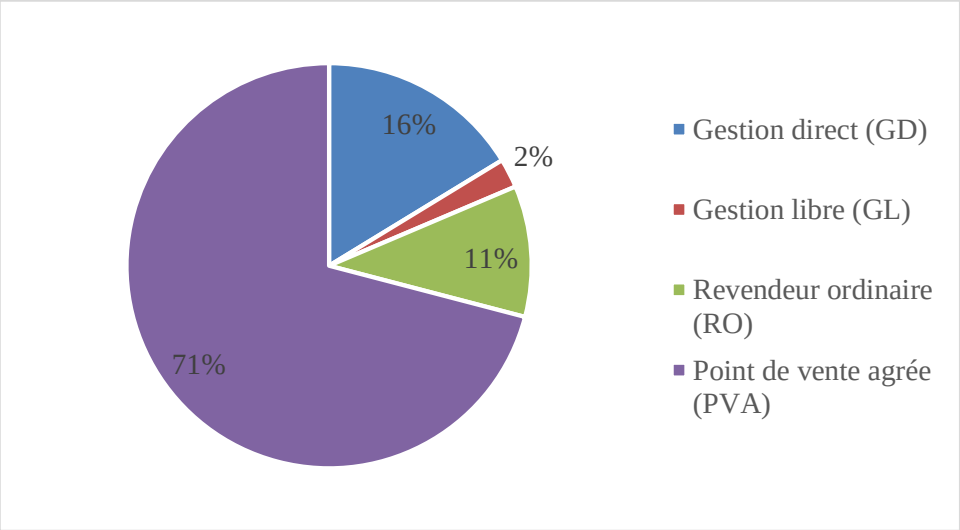


Figure 28. Répartitions des stations-service à Tizi-Ouzou selon leur nature

1.1.1.1. Stations GD (Gestion directe)

C'est des stations appartenant à la société Naftal avec un personnel de Naftal ; elles sont au nombre de 14.

1.1.1.2. Stations PVA (Point de vente agrée)

Ce sont des stations privées agrées par le ministère de l' Énergie. Elles sont liées à Naftal par un contrat de vente exclusif. Elles portent le logo et les couleurs de Naftal. Elles sont au nombre de 61.

1.1.1.3. Stations RO (Revendeurs ordinaires)

C'est de petites stations avec de petites capacités (pas assez grandes pour être des PVA). Elles achètent et revendent les produits de Naftal. Elles sont au nombre de 9.

1.1.1.4. Stations GL (Gérance libre)

C'est des stations de Naftal louées à des gérants libres. En général, il s'agit de petites stations héritées de l'époque coloniale, ex-sociétés SHELL, BP, ESSO… qui après nationalisation ont été remises en gérance libre à des citoyens contre un loyer annuel. Elles sont au nombre de 2.

Le nombre de stations-services à Tizi-Ouzou montre une tendance à l'évolution, il n'y a jamais de fermeture sauf pour des raisons règlementaires. Actuellement, il y a environ quatre projets de station-service en cours de réalisation et plusieurs autres en cours d'étude. La majorité des stations-services sont privées, les stations étatiques représentent seulement 18% du total.

1.1.2. Stockage des carburants

L'essence super et le diesel sont stockés au niveau du centre de stockage (CDS) de carburants de Tizi-Ouzou. Ce dernier est organiquement rattaché au district carburant d'Alger. Étant donné que le centre de stockage de Tizi-Ouzou ne dispose pas de bac pour stocker l'essence sans plomb, les commandes de ce carburant sont automatiquement dirigées au centre carburant d'Alger. Le GPL/C, quant à lui, est stocké au niveau du centre emplisseur GPL de Tizi-Ouzou. Le parc automobile de la région de Tizi-Ouzou est neuf, de ce fait, l'essence normal n'est pas commercialisée.

Les prix des carburants ont tous augmenté ces dernières années, à part le prix du GPL-C car l'État veut encourager son utilisation, vu que c'est un carburant moins polluant. Naftal dispose de centres de reconversion vers le GPL/C. Cependant, la demande n'arrive pas à être satisfaite, et la liste d'attente avoisine les milliers de demandes.

Les capacités de stockage au niveau des stations-service sont représentées au niveau du tableau 5.

Tableau 5. Capacités de stockage des carburants au niveau des stations-service à Tizi-Ouzou

	Nombre Stations	Super M^3	Sans Pb M^3	Diesel M^3	GPL/C M^3	TOTAL M^3
Gestion Directe (GD)	14	238	210	781	70	1299
Gestion Libre (GL)	2	30	20	30	0	80
Revendeur Ordinaire (RO)	9	118	69	278	20	485
Points de Vente Agrées (PVA)	61	1380	1340	3140	140	6000
T O T A L	86	1766	1639	4229	230	7864

En analysant la figure 29, nous observons que les points de vente agréés totalisent la plus grande capacité de stockage de carburants (76%), suivi par les stations à gestion directe (17%), les revendeurs ordinaires (6%) et les stations à gestion libre (1%). Ce classement suit exactement la répartition des stations-service selon leur nombre.

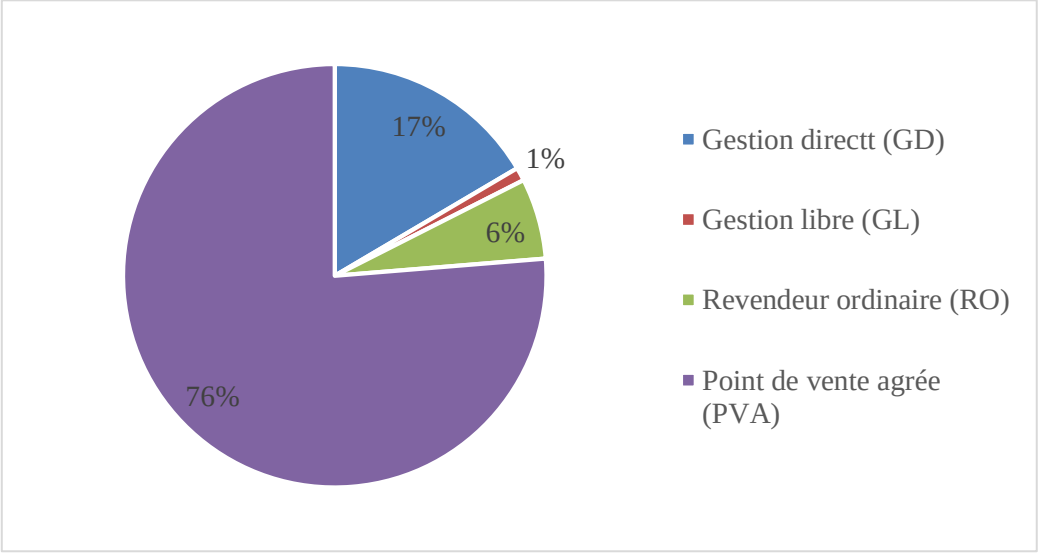


Figure 29. Répartition des capacités de stockage par type de station à Tizi-Ouzou

En analysant la figure 30, nous pouvons en déduire que le diesel détient la plus grande capacité de stockage (54%), suivi par l'essence super (22%) et l'essence sans plomb (21%), et enfin le GPL/C (3%).

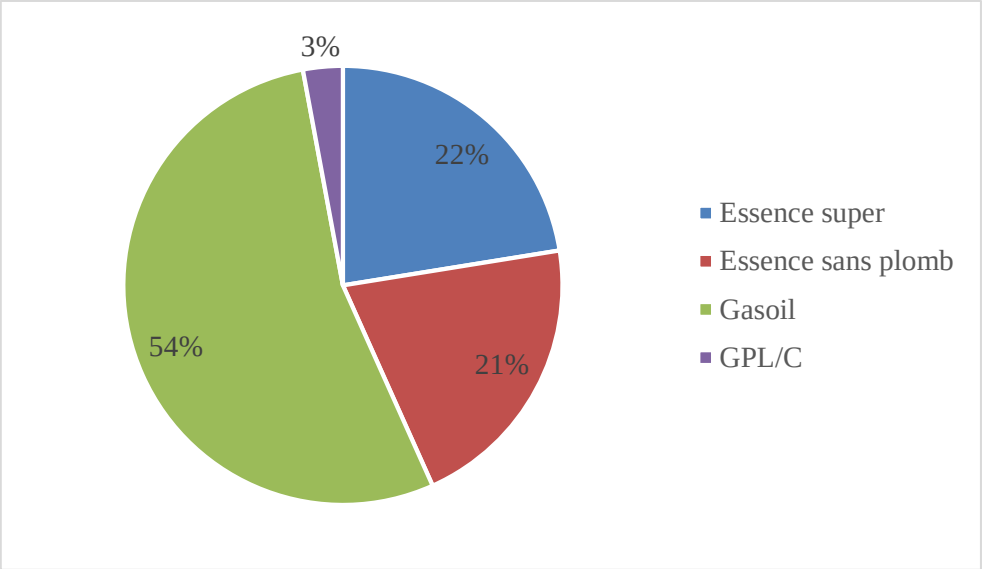


Figure 30. Répartition des capacités de stockage par type de carburant dans les stations-services de Tizi-Ouzou

1.1.3. Analyse des quantités de carburants distribuées au niveau de Tizi-Ouzou

Pour des raisons de disponibilité de données détaillées, nous n'avons pris en considération que les stations à gestion directe de la wilaya de Tizi-Ouzou (Tableau 6).

Tableau 6. Quantités annuelles distribuées au niveau des stations-service à gestion direct de Tizi-Ouzou (M^3)

Mois	Essence Super	Diesel	Essence Sans Plomb	GPL/C	TOTAL
JANVIER	906,39	4 091,92	744,26	274,13	**6 016,70**
FEVRIER	911,81	4 211,99	759,88	278,78	**6 162,46**
MARS	1 103,66	5 126,02	962,54	308,35	**7 500,57**
AVRIL	998,55	4 669,57	863,74	287,41	**6 819,27**
MAI	1 009,62	4 712,41	842,27	278,62	**6 842,91**
JUIN	998,78	4 299,47	849,56	261,89	**6 409,71**
JUILLET	1 137,97	5 080,61	1 094,76	340,51	**7 653,85**
AOUT	1 247,43	5 217,85	1 230,60	437,67	**8 133,55**
SEPTEMBRE	1 055,77	4 495,26	932,76	399,42	**6 883,20**
OCTOBRE	1 038,93	4 704,49	861,52	250,69	**6 855,63**
NOVEMBRE	1 018,66	4 634,23	895,42	308,35	**6 856,66**
DECEMBRE	792,80	3 985,35	769,56	194,96	**5 742,67**
TOTAL	**12 220,38**	**55 229,17**	**10 806,85**	**3 620,78**	**81 877,19**

Le mois de décembre est le mois où la consommation de carburant est la plus faible, avec un total de 5742,67M^3 pour tous types de carburants. À l'opposée, le mois d'août est le mois où la consommation de carburant est la plus forte, avec un total de 8133,55M^3 pour tous types de carburants. Ceci serait dû au fait que ce mois coïncide avec une période de vacances où la circulation automobile est plus importante et les trajets sont plus longs. Comme le montre la figure 31, le diesel est le carburant le plus consommé (68%), suivi par l'essence sans plomb (15%), l'essence super (13%) et enfin le GPL/C (4%).

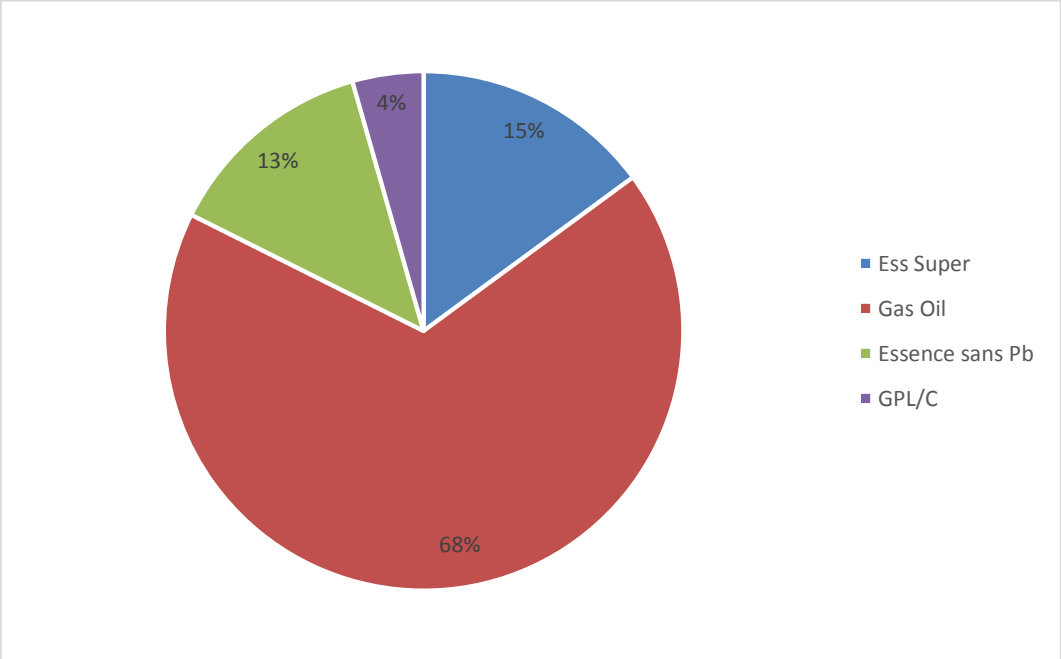


Figure 31. Consommation annuelle (%) par type de carburant au niveau des stations-service à gestion direct de Tizi-Ouzou

1.2. Analyse spatiale

Sur les 67 communes que compte la wilaya de Tizi-Ouzou, 21 communes sont dépourvues de stations-services. Au-dessus de 20 000 habitants, il n'y a qu'une seule commune dépourvue de station-service (Ath Yahia Moussa), toutes les autres communes sont pourvues de stations. La commune de Tizi-Ouzou est la mieux équipée en matière de nombre de stations avec 12 stations-services, ceci est dû au fait qu'elle présente la plus forte population (135 088 habitants). Les communes dont le nombre d'habitants est compris entre 10 000 et 20 000 comptabilisent le plus grand nombre de stations (31), chose due au fait que cet intervalle présente le plus grand nombre de communes (27). Le nombre le plus faible de stations est représenté au niveau de la tranche de < 5 000 habitants (pour 6 communes, il y a 2 stations) (tableau 7).

Tableau 7. Répartition du nombre de stations-services et des communes selon le nombre d'habitants

Population	Nombre communes	Nombre stations	Communes sans station
> 100 000	1	12	0
> 30 000 < 100 000	5	12	0
> 20 000 < 30 000	12	21	1
> 10 000 < 20 000	27	31	7
> 5 000 < 10 000	16	8	9
< 5 000	6	2	4

Le semis de points (Fig. 32) montre la répartition des 86 stations-services sur l'ensemble de du territoire de la wilaya. Le centre moyen avec la distance de Bachi (figure 33) nous renseigne sur la partie la mieux représentée en matière de stations-services. Le centre moyen se situe au centre de la wilaya pas très loin de la commune de Tizi-Ouzou où le nombre de stations-services est élevé. La distance de Bachi indique une grande dispersion des stations-service, qui, de ce fait, couvrent une grande partie du territoire la wilaya de Tizi-Ouzou.

L'ellipse standard (Fig. 34) couvre une surface très importante comprenant des communes du centre (commune de Tizi-Ouzou notamment). Elle prend une forme allongée avec une orientation Est-Ouest (Est-Nord-Est, Ouest-Sud-Ouest). Cette direction privilégiée du semis de points représentant les stations-services s'explique, entre autres, par la présence d'une forte population dans le centre de la wilaya et le passage de la RN12 qui suit une orientation Est-Ouest, au bord de laquelle beaucoup de stations-services sont implantées.

Les polygones de Thiessen (Fig. 35) mettent en évidence une concentration de stations-services au niveau central de la wilaya, surtout au niveau de la commune de Tizi-ouzou. Les polygones s'élargissent au niveau de la périphérie de la wilaya, impliquant une concentration moins importante, plus particulièrement dans les zones périphériques des côtés Est et Sud.

Les polygones de Thiessen, pour les stations à gestion directe (Fig. 36), indiquent une répartition assez étendue sur le territoire de la wilaya. D'un autre côté, les régions périphériques Est et Sud sont les moins équipées en stations à gestion directe. Les polygones de Thiessen, pour les stations à caractère privé (Fig. 37), indiquent une concentration de stations au niveau central de la wilaya, surtout aux environs de la commune de Tizi-Ouzou. Les stations-services deviennent moins nombreuses en s'éloignant du centre, en allant vers les périphéries, surtout des côtés Est et Sud.

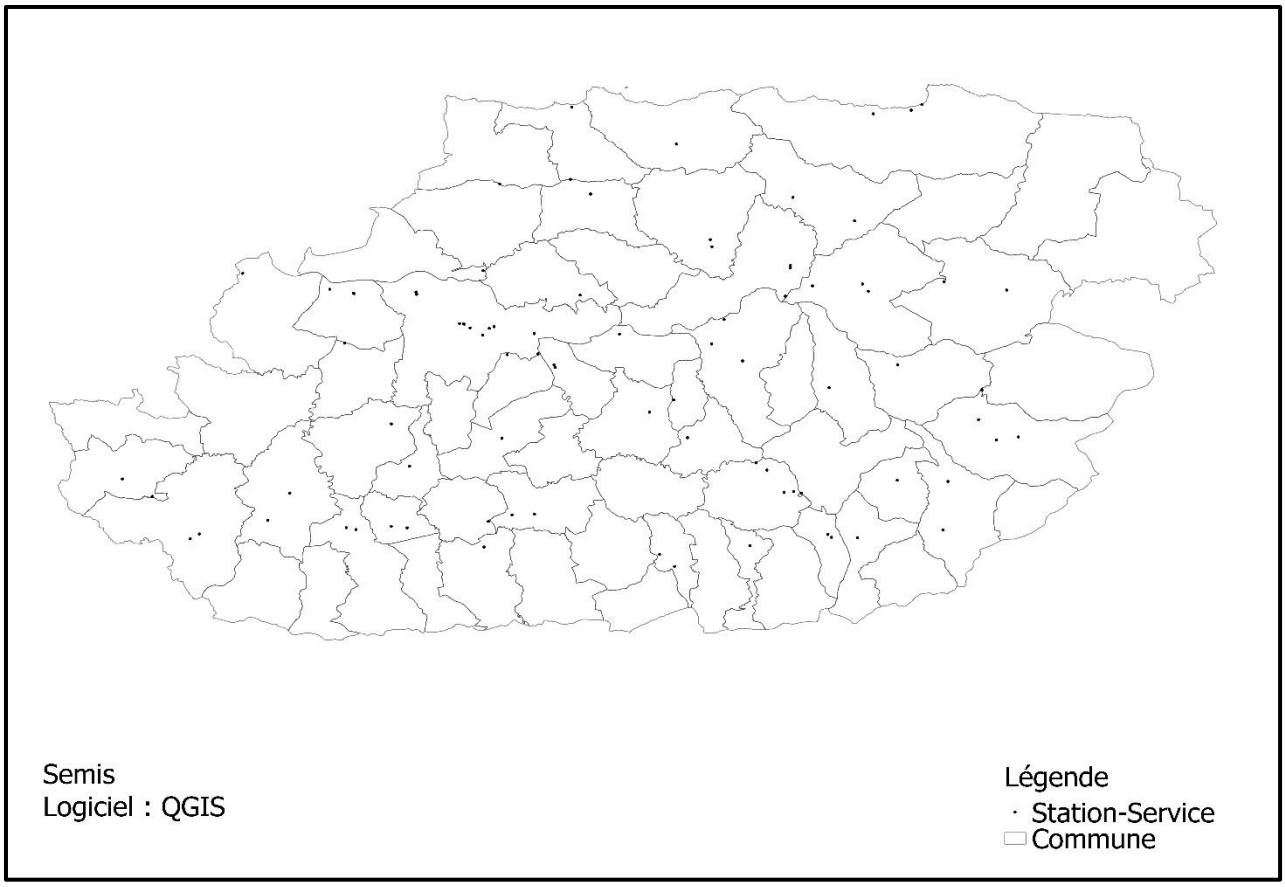


Figure 32. Semis de points des stations-service de Tizi-Ouzou

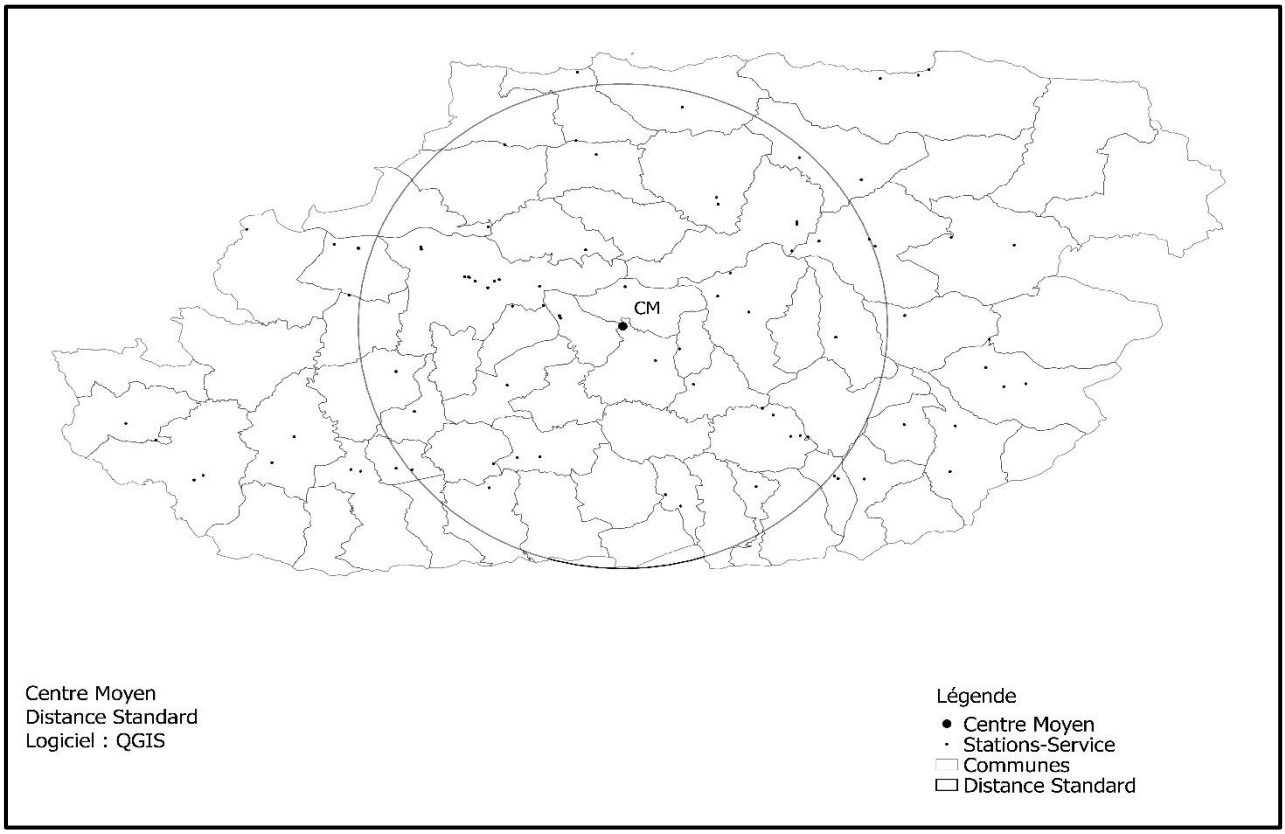


Figure 33. Centre moyen et distance de standard des stations-service de Tizi-Ouzou

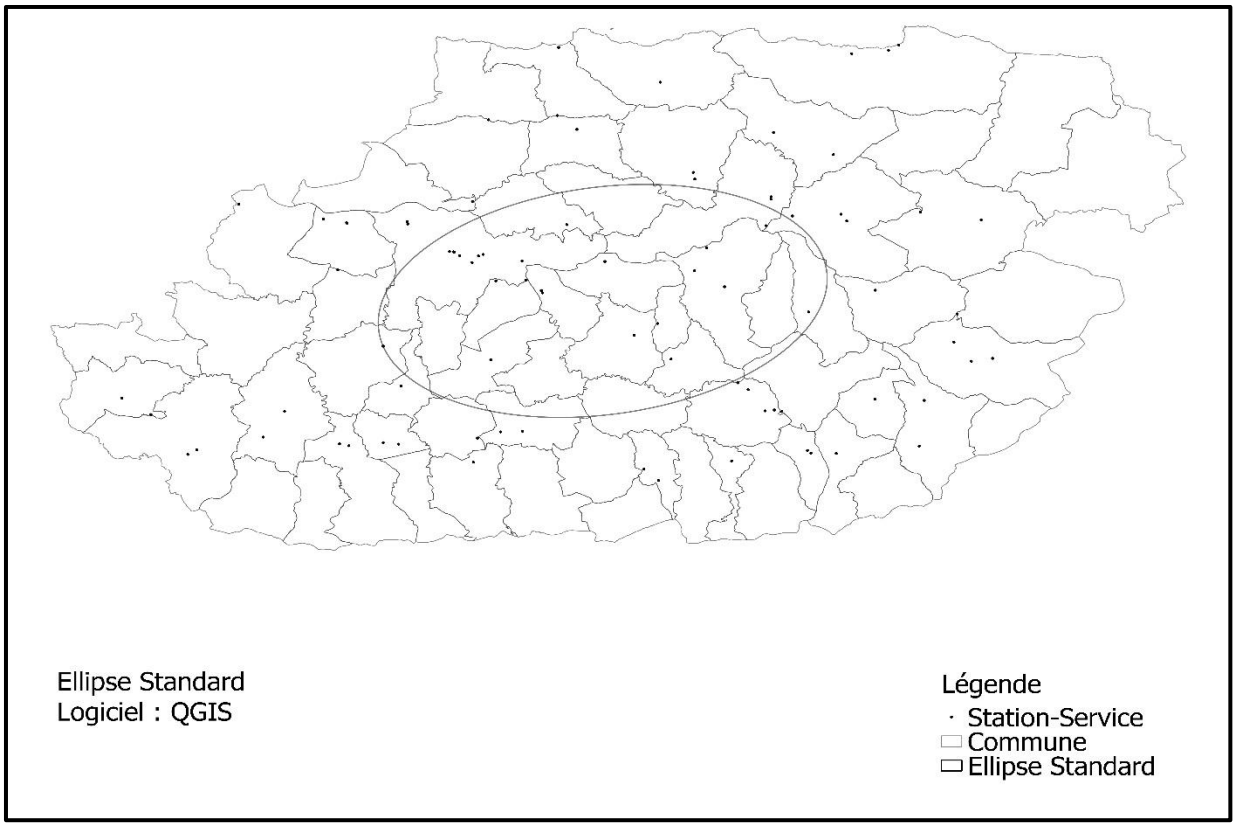


Figure 34. Ellipse standard des stations-service de Tizi-Ouzou

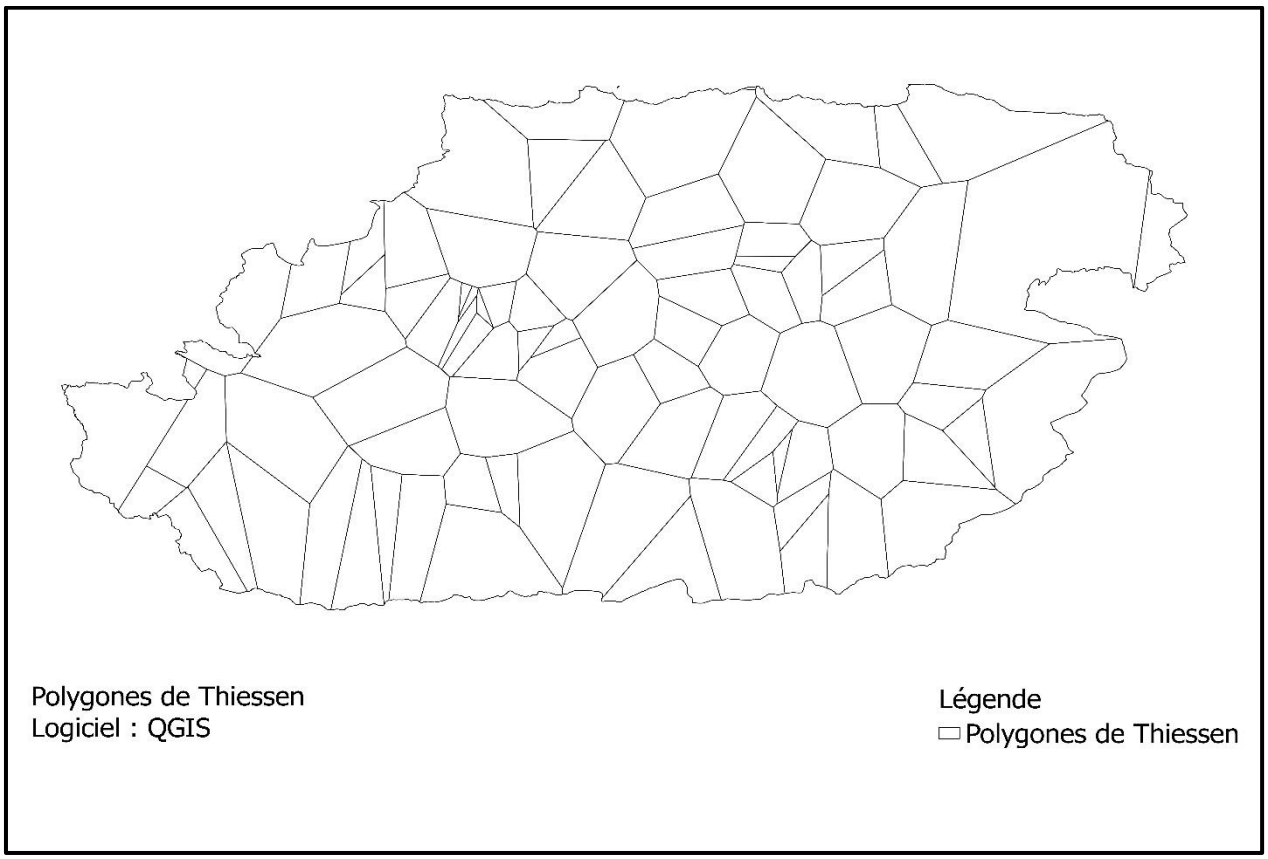


Figure 35. Polygones de Thiessen des stations-service de Tizi-Ouzou

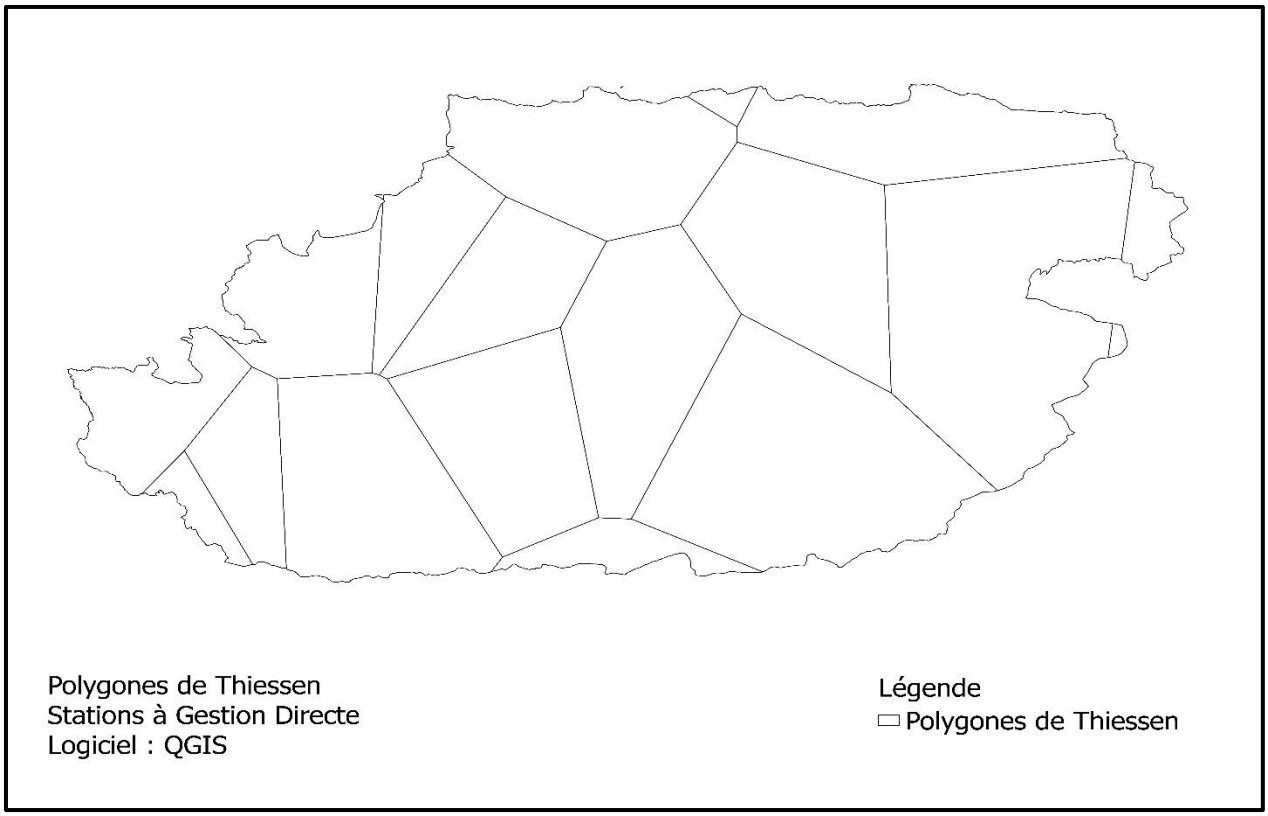


Figure 36. Polygones de Thiessen des stations-service à gestion direct de Tizi-Ouzou

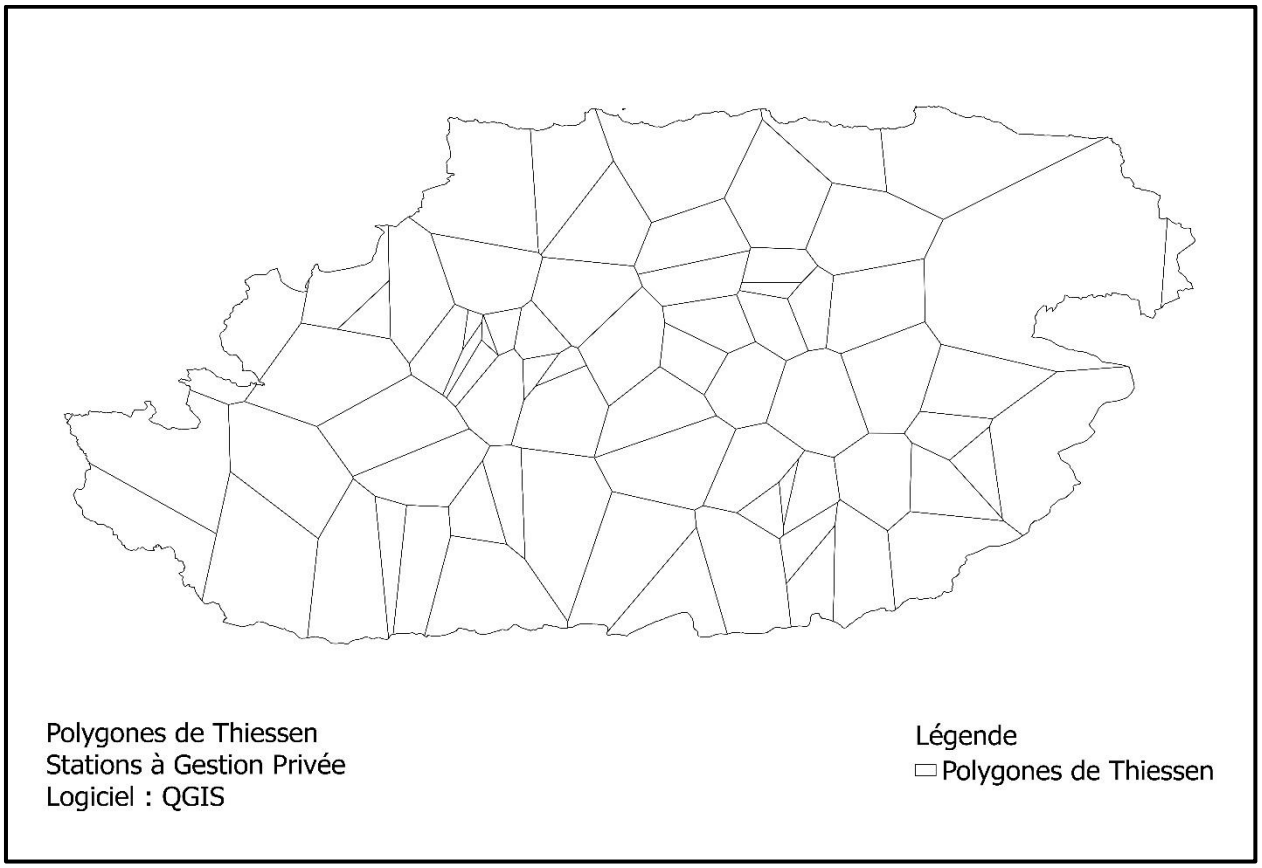


Figure 37. Polygones de Thiessen des stations-service privés de Tizi-Ouzou

2. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la végétation

Cette étude a fait l'objet d'une publication dans la revue scientifique « Journal of Environmental Research, Engineering and Management ».

2.1. Analyses physico-chimiques des sols

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol pour les 3 sites d'étude sont représentés dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8. Propriétés physico-chimiques des sols de chaque transect (T1 et T2) des trois sites d'échantillonnage

Sites	Zones	pH	Argile	Limon	Sable	CE	C	N	C/N	Humidité
1	1T1	7,6^{a}	28,35	34,82^{a}	36,82	0,42	1,03^{a}	0,03	34,50^{a}	24,43^{a}
	1T2	7,9^{a}	29,34	35,45^{a}	35,21	0,4	1,04^{a}	0,03	34,67^{a}	24,53^{a}
	2T1	8,2^{b}	36,7	36,33^{a}	26,97	0,34	0,23^{b}	0,05	4,53^{b}	24,35^{a}
	2T2	8,2^{b}	41,8	40,18^{a}	18,02	0,43	0,15^{b}	0,04	3,78^{b}	24,36^{a}
	3T1	8,4^{b}	39	34,27^{a}	26,73	0,38	0,46^{c}	0,05	9,19^{c}	20,93^{b}
	3T2	8,4^{b}	33,45	35,58^{a}	30,97	0,34	0,77^{c}	0,1	7,67^{c}	20,48^{b}
	4T1	8,2^{b}	38,5	23,7^{b}	37,81	0,4	0,15^{b}	0,14	1,08^{d}	17,10^{c}
	4T2	8,2^{b}	22,4	26,8^{b}	52,4	0,32	0,08^{b}	0,1	0,76^{d}	17,48^{c}
2	1T1	7,5	5,05	43,8^{a}	51,15	0,22	0,95^{a}	0,04^{a}	23,75^{a}	21,34^{a}
	1T2	7,4	3,55	43,9^{a}	52,55	0,18	0,92^{a}	0,05^{a}	18,37^{a}	21,08^{a}
	2T1	7,4	4,1	31,5^{b}	64,39	0,54	0,38^{b}	0,05^{a}	7,67^{b}	17,25^{b}
	2T2	8,5	8,45	30,4^{b}	61,15	0,63	0,46^{b}	0,1^{a}	4,59^{b}	17,33^{b}
	3T1	8,1	5,65	31,48^{b}	62,87	0,16	0,77^{c}	0,1^{a}	7,67^{b}	17,16^{b}
	3T2	7,9	4,2	31,52^{b}	64,27	0,88	0,69^{c}	0,14^{a}	4,94^{b}	17,03^{b}
	4T1	8	9,5	28,64^{b}	61,86	0,88	0,61^{c}	0,25^{b}	2,44^{b}	13,40^{b}
	4T2	8	2,35	23,01^{b}	74,64	0,89	0,89^{c}	0,24^{b}	3,71^{b}	16,18^{b}
3	1T1	7,8	3,54	13,96	82,5^{a}	0,48	1,56^{a}	0,05^{a}	31,20^{a}	22,57^{a}
	1T2	7,9	2,95	13,15	83,9^{a}	0,48	1,53^{a}	0,05^{a}	30,70^{a}	22,06^{a}
	2T1	8,2	8,2	31,9	62,15^{b}	0,41	1,38^{ab}	0,1^{b}	13,84^{b}	18,88^{b}
	2T2	8	12,5	24,36	63,06^{b}	0,4	1,20^{ab}	0,15^{b}	8,00^{b}	19,25^{b}
	3T1	7,7	5,35	31,81	62,83^{b}	0,47	0,84^{bc}	0,17^{bc}	4,96^{bc}	17,10^{c}
	3T2	7,9	5	31,62	63,37^{b}	0,25	0,92^{bc}	0,16^{bc}	5,74^{bc}	17,12^{c}
	4T1	7,9	9,5	26,68	63,82^{b}	0,23	0,69^{c}	0,2^{c}	3,46^{c}	12,80^{d}
	4T2	7,9	4,1	41,93	53,97^{b}	0,42	0,30^{c}	0,25^{c}	1,21^{c}	12,38^{d}

Les résultats pour l'humidité, le carbone, l'azote, l'argile, le limon, et le sable sont exprimé en pourcentage, la conductivité électrique en µS/cm. Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

Tableau 9. Analyses des TPH (qualitatifs et quantitatifs) des sols de chaque transect (T1 et T2) des trois sites d'échantillonnage

Site	Zones	TPH	Site	Zones	TPH	Site	ZOnes	TPH
1	1T1	Polluée	2	1T1	Polluée	3	1T1	336,35[a]
	1T2	Polluée		1T2	Polluée		1T2	333,62[a]
	2T1	Polluée		2T1	Polluée		2T1	228,34[b]
	2T2	Polluée		2T2	Polluée		2T2	104,63[b]
	3T1	Polluée		3T1	Polluée		3T1	10,83[c]
	3T2	Polluée		3T2	Polluée		3T2	28,95[c]
	4T1	Non polluée		4T1	Non polluée		4T1	0[c]
	4T2	Non polluée		4T2	Non polluée		4T2	0[c]

Les résultats pour les TPH sont exprimés en mg/kg. Les résultats des tests qualitatifs des produits pétroliers sont indiqués par les mentions ''Non pollué'' et ''pollué''. Différentes lettres indiquent des différences significatives (p<0.05).

Les analyses des TPH sur le site 3 ont montré une contamination suivant une structure en gradient à travers les différentes zones, des zones 1 (zones les plus polluées, avec 336,35mg/kg et 333,62mg/kg) aux zones 4 (aucune pollution détectée). Des tests qualitatifs ont montré la présence de zones contaminées dans les sites 1 et 2, et les taux de carbone dans ces deux sites suggèrent une nette différenciation entre la zone 1 et les autres zones. Les résultats obtenus montrent que la contamination par les produits pétroliers a entraîné une augmentation des taux de carbone et de l'humidité dans tous les sites, et potentiellement une baisse du pH des sites 1 et 2.

Pour chaque site, la composition granulométrique était assez similaire dans les différentes zones. Cependant, nous avons observé quelques variations, en particulier pour les taux de sable sur le site 3. Les taux de carbone, de TPH, et d'humidité diminuent progressivement de la zone 1 à 4, tandis que l'azote prend une tendance opposée. Il n'y a aucune tendance particulière observée pour la conductivité électrique. Les groupes homogènes (indiqués dans le tableau 10 par des lettres différentes) mettent en évidence les différences significatives à travers les différentes zones. Les zones 1 (les zones les plus contaminées) sont souvent représentées dans un groupe distinct, contrairement aux 3 autres zones, ce qui suggère une influence importante des rejets des stations-service sur les propriétés du sol dans les zones 1. Dans le site 3, la corrélation de Pearson a montré une très forte corrélation positive ($P < 0,05$) entre les TPH et le rapport C/N (tableau 10).

Tableau 10. Coefficients de corrélation entre les propriétés physico-chimiques du sol et les indices écologiques

	Site 1				**Site 2**				**Site 3**				
	N	**S**	**H'**	**J**	**N**	**S**	**H'**	**J**	**N**	**S**	**H'**	**J**	**TPH**
pH	0,91*	0,78*	0,79*	-0,88*	0,50	0,57	0,64	0,67	-0,09	-0,16	0,05	0,32	0,20
Clay	0,36	0,26	0,29	-0,41	0,09	0,11	0,19	0,30	0,20	0,04	0,20	0,15	-0,32
Silt	-0,33	-0,52	-0,47	0,22	-0,93*	-0,57	-0,72*	-0,82*	0,77*	0,93*	0,88*	0,16	-0,79*
Sand	-0,04	0,13	0,08	0,14	0,89*	0,53	0,65	0,71	-0,79*	-0,88*	-0,86*	-0,16	0,85*
EC	-0,45	-0,33	-0,36	0,36	0,69	0,23	0,42	0,57	-0,54	-0,28	-0,33	0,01	0,59
C	-0,72*	-0,75*	-0,85*	0,54	-0,19	-0,50	-0,61	-0,65	-0,96*	-0,92*	-0,64	0,32	0,90*
N	0,70	0,70	0,63	-0,69	0,87*	0,11	0,26	0,40	0,95*	0,90*	0,68	-0,24	-0,94*
C/N	-0,92*	-0,84*	-0,90*	0,82*	-0,83*	-0,66	-0,79*	-0,83*	-0,85*	-0,88*	-0,84*	-0,08	0,97*
H	-0,71*	-0,82*	-0,75*	0,64	-0,88*	-0,46	-0,61	-0,73*	-1,00*	-0,86*	-0,61	0,33	0,88*
TPH	X	X	X	X	X	X	X	X	-0,87*	-0,88*	-0,78*	0,03	1,00

** Corrélations significatives (p < 0,05) ; H : humidité. Différentes lettres indiquent des différences significatives (p<0.05).*

2.2. Inventaire de la végétation et indices écologiques

L'abondance totale des espèces dans chaque zone a présenté une tendance générale, montrant une augmentation progressive de la zone 1 à la zone 4 (annexe 1). Les zones non polluées présentent les abondances les plus importantes. Cette tendance n'est pas systématiquement retrouvée lorsque nous examinons la richesse en espèces, mais nous pouvons voir que la zone 1 est toujours la moins riche en espèces (annexe 1). Ces observations suggèrent une influence négative de la contamination et de l'altération des propriétés du sol.

Les groupes homogènes (représentés en annexe 1 par des lettres différentes) mettent en évidence des différences significatives entre les différentes zones. Les zones 1 sont souvent représentées dans un groupe à part suggérant que les niveaux de contamination élevés de cette zone ont eu une grande influence sur sa végétation.

Les annexes 2, 3 et 4 présentent l'abondance-dominance des espèces végétales pour les sites 1, 2 et 3 respectivement. *Avena sp*, *Conium maculatum* et *Oxalis pes-caprae* présentent une bonne répartition dans les différentes zones des sites étudiés, nous les retrouvons même dans la zone 1. Alors que d'autres espèces présentent une répartition appréciable mais dans une seule station, c'est le cas de : *Elymus repens* dans le site 3, *Vicia sativa*, *Cerinthe major* et *Senecio vulgaris* dans le site 1 et *Galactites tomentosa* dans le site 2.

Xanthium strumarium a montré une préférence pour la zone 1, en particulier dans les sites 2 et 3, présentant une tendance à dominer dans la zone 1. Alors qu'il est rare dans la zone 3 et carrément absent dans la zone 4.

Dans les zones polluées, nous avons constaté que certaines espèces de plantes ont été peu ou pas retrouvées. C'est le cas de : *Beta vulgaris*, *Senecio vulgaris*, *Malva sylvestris*, *Sonchus oleraceus*, *Galactites tomentosa* et *Scolymus hispanicus*.

Nous avons observé des valeurs faibles de H' dans la zone 1, correspondant à de faibles abondances et à une faible richesse en espèces. Les sites 2 et 3 montrent de faibles valeurs de H' dans les zones 4 ainsi que dans les zones 3 pour le site 3 (annexe 1), en raison notamment de la dominance d'*Avena sp* et d'*Oxalis pes-caprae*. Les faibles valeurs de H' dans les zones 4 du site 1 sont dues à la dominance d'*Oxalis pes-caprae*.

Le coefficient de Sorensen–Dice a montré que les similitudes les plus fortes se situent entre les zones 2 et 3 et les zones 3 et 4. Les différences les plus fortes concernent les zones 1 et 4 et les zones 2 et 4 (Fig. 38). Il existe donc une différenciation entre les zones les plus polluées et les zones les moins et les non polluées.

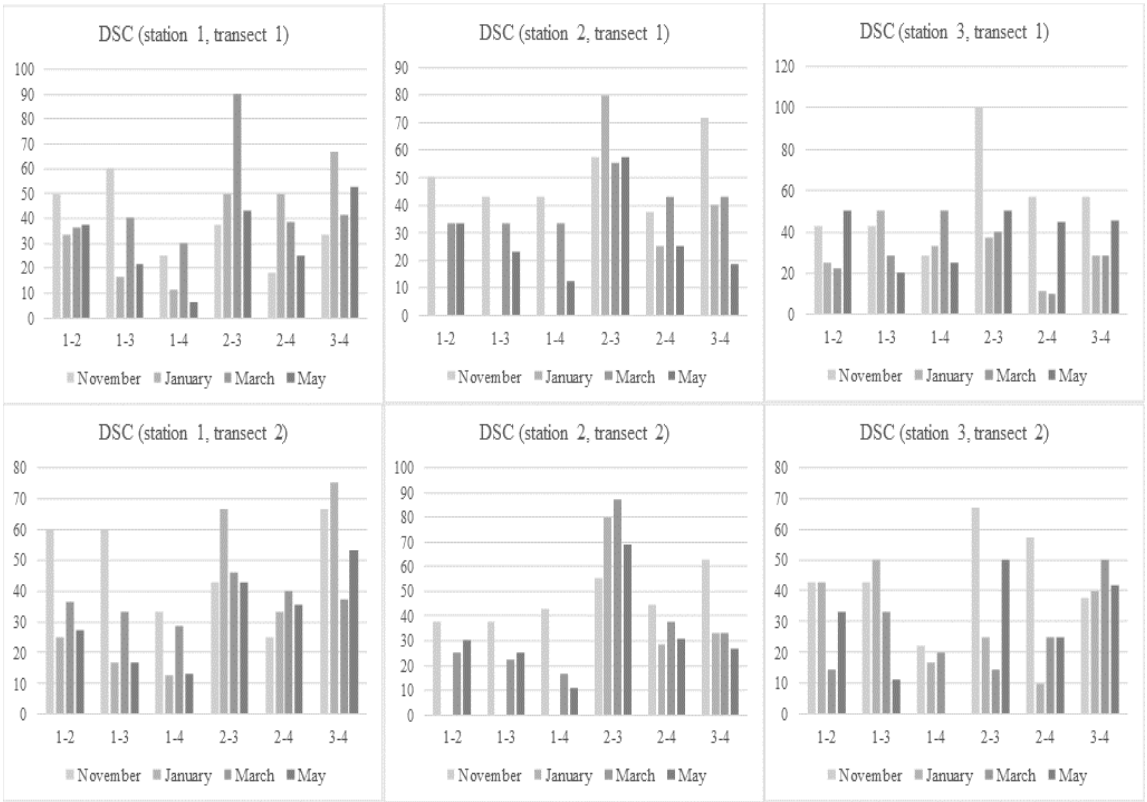


Figure 38. Valeurs du coefficient de Sorensen–Dice (DSC) pour l'échantillonnage de la végétation des trois sites (Transects 1 et 2).

La corrélation linéaire de Pearson (tableau 10) a révélé que le rapport C/N, l'humidité et les TPH sont les paramètres qui influencent principalement les différents indices écologiques. Pour le site 1, le pH est également un paramètre important. L'abondance et H' semblent être les indices les plus influencés ; il n'y a ainsi pas de corrélation significative pour S sur le site 2 et J sur le site 3. Par conséquent, la structure de la végétation a été influencée à la fois par la contamination et les modifications induites dans les propriétés physico-chimiques du sol.

3. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la faune

Les résultats obtenus pour les 3 échantillonnages réalisés sont présentés dans les tableaux 11, 12 et 13. Nous avons identifié 10 ordres pour la méthode des pots Barber en août (2018), 18 ordres en Mai (2019), et 12 ordres pour la méthode d'extraction (Avril 2019).

Tableau 11. Abondances des ordres d'invertébrés dans chaque zone de chaque transect (méthode des pots Barber, Août)

Zones	**1T1**	**1T2**	**2T1**	**2T2**	**3T1**	**3T2**	**4T1**	**4T2**
Araneae	13	7	12	12	21	17	21	18
Coleoptera	4^{a}	10^{a}	19^{ab}	35^{ab}	56^{c}	73^{c}	41^{bc}	46^{bc}
Diptera	2	5	6	6	1	4	2	4
Hemiptera	3	2	2	8	11	12	5	10
Hymenoptera	125	153	347	239	181	178	376	189
Isopoda	3	11	1	4	2	1	1	0
Mantodea	0	1	1	0	0	0	0	0
Parasitiformes	1	1	2	4	4	5	15	5
Orthoptera	0	2	1	1	1	0	0	0
Stylommatophora	1	0	4	1	0	0	0	1

Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

Tableau 12. Abondances des ordres d'invertébrés dans chaque zone de chaque transect (méthode des pots Barber, Mai)

Ordre	**1T1**	**1T2**	**2T1**	**2T2**	**3T1**	**3T2**	**4T1**	**4T2**
Haplotaxida	0	0	1	0	0	1	2	0
Hemiptera	3	8	3	7	5	7	9	4
Coleoptera	16	22	40	20	52	32	37	33
Stylommatophora	6	4	4	2	7	7	10	6
Hymenoptera	75	84	182	101	240	190	110	130
Diptera	13	8	20	16	21	39	19	26
Entomobryomorpha	28	38	62	63	80	50	30	49
Chilopoda	0^{a}	1^{a}	2^{a}	1^{a}	1^{a}	2^{a}	4^{b}	5^{b}
Diplopoda	4^{a}	5^{a}	8^{a}	5^{a}	6^{a}	6^{a}	1^{b}	1^{b}
Parasitiformes	4	9	20	15	11	33	11	20
Larve d'insects	2	1	0	0	2	1	0	0
Embioptera	0	0	0	0	2	0	1	2
Aranea	7^{a}	8^{a}	11^{a}	9^{a}	12^{ab}	13^{ab}	20^{c}	15^{c}
Orthoptera	1	2	1	0	0	1	0	0
Mantodea	0	0	1	0	0	0	0	0
Isopoda	1^{a}	2^{a}	0^{b}	0^{b}	0^{b}	0^{b}	0^{b}	0^{b}
Symphypliona	0^{a}	0^{a}	0^{a}	0^{a}	0^{a}	0^{a}	1^{b}	2^{b}
Blattaria	0	0	0	0	0	0	1	0

Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

Tableau 13. Abondances des ordres d'invertébrés dans chaque zone de chaque transect (méthode d'extraction)

Ordre	**1T1**	**1T2**	**2T1**	**2T2**	**3T1**	**3T2**	**4T1**	**4T2**
Haplotaxida	3	8	1	3	28	12	10	15
Hemiptera	2	1	0	1	0	1	1	3
Coleoptera	2	4	3	6	1	2	6	4
Stylommatophora	12	39	0	1	13	14	37	12
Hymenoptera	2^{a}	5^{a}	14^{ab}	10^{ab}	20^{b}	15^{b}	8^{ab}	9^{ab}
Diptera	0	1	1	0	0	0	0	0
Entomobryomorpha	0	0	1	0	0	0	0	0
Chilopoda	0	0	0	0	7	0	2	10
Parasitiformes	3	1	2	1	1	0	4	3
Larve d'insects	0	0	0	1	0	0	0	0
Embioptera	1	0	0	0	0	0	0	0
Aranea	0	3	1	3	2	3	3	6

Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

Pour la première méthode avec les pots Barber (Tableaux 11 et 12), les Hymenoptera constituent l'ordre le plus abondant, suivis par les Coleoptera et les Araneae au mois d'août. Viennent ensuite les Entomobryomorpha et les Coleoptera en Mai. Pour la deuxième méthode par extraction (Tableau 13), les Stylommatophora sont les plus abondants, suivis par les Hymenoptera et Haplotaxida.

Pour la méthode des pots Barber en août (Tableau 11), nous remarquons que les Isopoda, Stylommatophora, Orthoptera, Diptera et Mantodea sont plus présents dans les zones contaminées. Par contre, les ordres des Parasitiformes, Hemiptera, Araneae et Coleoptera ont montré une préférence pour les zones les moins polluées et non polluées (zones 3 et 4). Les Hymenoptera présentent leur valeur la plus faible au niveau de la zone 1. L'abondance des Coleoptera diffère significativement entre les zones ($P = 0,011$), les différences se situent entre la zone 1 et 3 et entre la zone 1 et 4.

Pour la méthode des pots Barber en Mai (tableau 12), les Chilopoda, les Symphypliona et les Aranea sont plus abondants dans la zone 4. Les Diplopoda, Orthoptera, Isopoda sont plus abondants dans les zones polluées. Les Hymenoptera, les Entomobryomorpha, les Coleoptera, les Parasitiformes et les Diptera présentent leurs valeurs les plus faibles dans la zone 1. Les abondances de plusieurs ordres diffèrent significativement à travers les zones : l'ordre des Isopoda ($P = 0,029$) montre une différence entre la zone 1 et les autres zones ; les ordres des

Chilopoda (P = 0,018), Diplopoda (P = 0,025), Araneae (P = 0,027), et les Symphypliona (P = 0,029) montrent des différences significatives entre la zone 4 et les autres zones.

Pour la méthode d'extraction (tableau 13), les Parasitiformes présentent leurs valeurs les plus importantes au niveau de la zone 4, les Stylommatophora sont très présents au niveau de toutes les zones sauf la zone 2, les Hymenoptera présentent leur plus faible valeur au niveau de la zone 1, les Haplotaxida, les Chilopoda et les Aranea sont moins abondants au niveau des zones 1 et 2. L'ordre des Hymenoptera montre une différence significative (P = 0,021) entre les zones, la différence se situant entre la zone 1 et la zone 3.

Le nombre d'individus de plusieurs ordres semble être influencé par la pollution du sol par les produits pétroliers. Selon les ordres, il existe une différenciation soit entre la zone 1 (la plus proche de la source de pollution) et les autres zones, soit entre les zones 2 et 3 d'un côté et 3 et 4 d'un autre côté, ou encore entre la zone 4 (non polluée) et les autres zones. Les zones 1 présentent les valeurs d'abondance les plus faibles. Cependant pour la méthode d'extraction dans la zone 1 du transect 2, le nombre d'individus total obtenu est important, et ceci est dû à une forte abondance des Stylommatophora (tableau 13). Le nombre d'ordres n'a pas montré une tendance particulière qui pourrait suggérer une influence par la contamination, et ceci pour toutes les méthodes.

Pour la méthode des pots Barber en août, les valeurs de H' et J (tableau 14) présentent une tendance générale, avec des valeurs plus élevées pour les zones 3 et 4 par rapport aux zones 1 et 2, sauf pour la zone 4T1 où il y'a une forte dominance par les Hymenoptera (tableau 11).

Tableau 14. Abondance totale (N), nombre d'ordres (NO), diversité de Shannon-Weaver (H'), et équitabilité de Pielou (J) dans chaque zone de chaque transect pour la méthode des pots Barber en Août

Zones	**N**	**NO**	**H'**	**J**
1T1	152	8^a	1,07	0,36
1T2	192	8^a	1,24	0,41
2T1	395	10^b	0,82	0,25
2T2	310	9^b	1,28	0,40
3T1	277	8^a	1,53	0,51
3T2	290	7^a	1,57	0,56
4T1	461	7^a	1,03	0,37
4T2	273	7^a	1,45	0,52

Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

Pour la méthode des pots Barber en Mai, les valeurs de H' et J (tableau 15) sont généralement plus élevées au niveau de la zone 4.

Tableau 15. Abondance totale (N), nombre d'ordres (NO), diversité de Shannon-Weaver (H'), et équitabilité de Pielou (J) dans chaque zone de chaque transect pour la méthode des pots Barber en Mai

Zones	**N**	**NO**	**H'**	**J**
1T1	160[a]	12	2,49	0,69
1T2	192[a]	13	2,59	0,70
2T1	355[ab]	13	2,27	0,61
2T2	239[ab]	10	2,37	0,71
3T1	439[b]	12	2,11	0,59
3T2	382[b]	13	2,4	0,65
4T1	256[ab]	14	2,67	0,70
4T2	293[ab]	12	2,52	0,70

Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

Pour la méthode d'extraction, les valeurs de H' (tableau 16) sont généralement plus élevées au niveau de la zone 4. La valeur de J est très importante au niveau de la zone 4T2, mais elle est beaucoup moins importante au niveau de la zone 4T1, ce qui est dû à une dominance par les Stylommatophora.

Tableau 16. Abondance totale (N), nombre d'ordres (NO), diversité de Shannon-Weaver (H'), et équitabilité de Pielou (J) dans chaque zone de chaque transect pour la méthode d'extraction

Zones	**N**	**NO**	**H'**	**J**
1T1	25	7	2,3	0,82
1T2	62	8	1,84	0,61
2T1	23	7	1,91	0,68
2T2	26	7	2,46	0,88
3T1	72	7	2,13	0,76
3T2	47	6	2,11	0,82
4T1	71	8	2,2	0,73
4T2	62	8	2,78	0,93

4. Essais de phytotoxicité sur quelques espèces végétales

4.1. Premier essai de phytotoxicité

Cette étude a fait l'objet d'une publication dans la revue scientifique « International Journal of Phytoremediation ».

4.1.1. Germination

Les taux de survie des plantes sont équivalents aux pourcentages de germination, puisque toutes les plantes germées ont survécu. La germination des graines de *X. strumarium* varie de 33 à 97% selon les niveaux de contamination. Ce pourcentage a augmenté (p-value = 0,000449) à mesure que la contamination par le diesel augmente, jusqu'à atteindre la valeur la plus élevée (97%) à 5g de diesel (tableau 17). À 7,5g de diesel, il y a eu une réduction significative de la germination (p <0,05) et le pourcentage de germination a atteint le niveau le plus faible (33%) à 10g de diesel (tableau 17). Les graines du groupe témoin et des traitements à faible taux de contamination (2,5 et 5g) ont germé et ont atteint leur pourcentage de germination le plus élevé plus rapidement comparativement à celles soumises à un niveau de contamination élevé (7,5 et 10g), résultats confirmés par les valeurs du CVG (figure 39 et tableau 17). Le pourcentage de germination a été réduit à 63% à 7,5g et jusqu'à 33% à 10g de diesel, contre 87% chez les témoins, 93% à 2,5g et 97% à 5g de diesel.

Le CVG a été réduit à 26,51% à 7,5g. Cette valeur diminue pour atteindre 5,67% à 10g de diesel (contre 63,09% chez le témoin, 78,61% à 2,5g et 68,69% à 5g de diesel). Par conséquent, nous pouvons déduire que les niveaux élevés de contamination (7,5 et 10g) réduisent (p-value = 0,000449) et retardent (p-value = 0,000103) la germination. La CE50 pour la germination est de 8,880g.

Tableau 17. Pourcentage de germination des grains, la longueur racinaire, la longueur des tiges, et le coefficient de vélocité de germination de *X. strumarium* à différents niveaux de contamination par le diesel 14 jours après la semence

Niveaux de contamination (g/100g de sol)	Pourcentage de germination (%)	Longueur racinaire (cm)	Longueur de tige (cm)	Coefficient de vélocité de germination (%)
0	87 ± 5.77^{a}	12.89 ± 2.76^{a}	8.02 ± 0.97^{a}	63.09 ± 7.67^{a}
2,5	93 ± 11.55^{a}	18.71 ± 4.29^{b}	7.20 ± 0.82^{b}	78.61 ± 16.54^{a}
5	97 ± 5.77^{a}	19.92 ± 4.30^{b}	6.80 ± 0.59^{b}	68.69 ± 8.72^{a}
7,5	63 ± 20.82^{b}	19.87 ± 6.85^{b}	5.23 ± 1.68^{c}	26.51 ± 17.87^{b}
10	33 ± 11.55^{c}	19.22 ± 7.50^{b}	3.91 ± 1.73^{d}	5.67 ± 3.35^{b}

Les données sont des moyennes ± l'écart type, elles sont calculées à partir de trois répétitions pour chaque mesure. Différentes lettres indiquent des différences significatives (p<0.05).

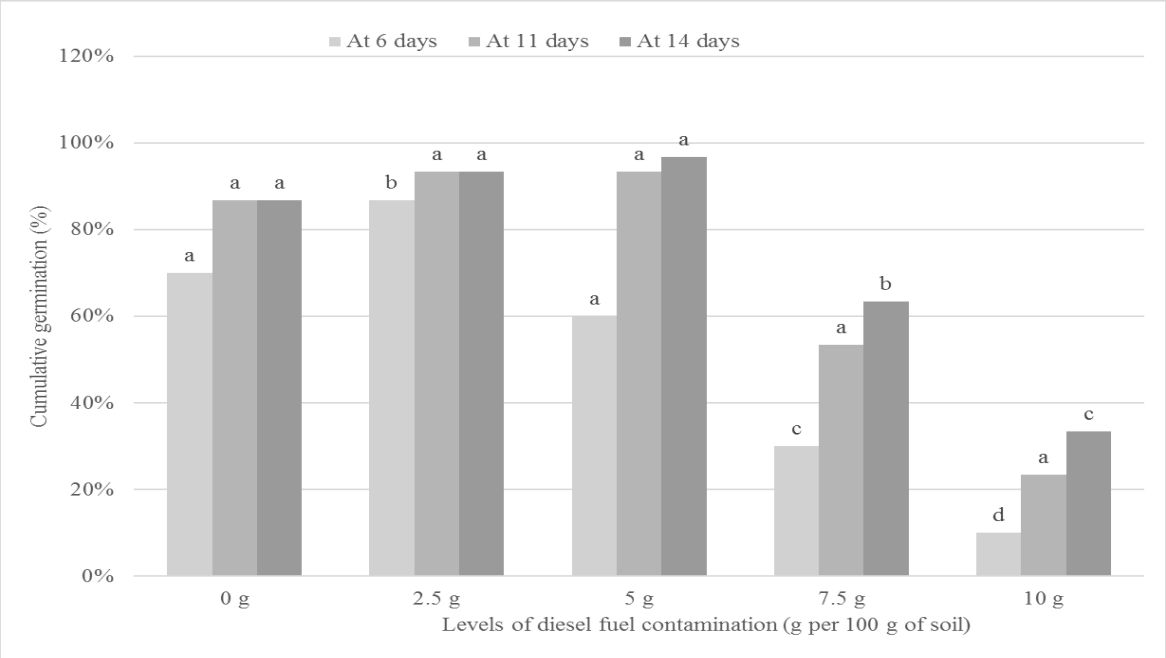


Figure 39. Germination cumulée de *X. strumarium* à différents niveaux de contamination par le diesel.
La germination a été enregistrée à 6 jours , 11 jours , et 14 jours .
Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

4.1.2. Longueur racinaire

La longueur racinaire la plus importante (19,92cm) a été enregistrée avec 5g de diesel et la plus faible (12,89cm) chez le témoin. La longueur des racines augmente avec l'augmentation de la contamination au diesel (p-value 0,022767), jusqu'à 7,5g de diesel, à ce niveau-là il y'a eu une réduction à 19,87cm, mais cette dernière n'est pas significative (les niveaux de contamination 5g et 7,5g sont représentés dans le même groupe homogène) (tableau 17). Malgré une réduction, les racines sont plus longues à 7,5g (19,87cm) et 10g (19,22cm) de diesel qu'au niveau du témoin (12,89cm) et à 2,5g de diesel (18,71cm) (tableau 17). La CE50 pour la croissance des racines est de 0,091.

4.1.3. Longueur de la tige

Les résultats des longueurs de tige de *Xanthium strumarium* traitée ou non au diesel sont représentés sur le tableau 17. Nous remarquons que la longueur de tige la plus longue (8,02cm) a été enregistrée chez le témoin et la tige la plus courte (3,91cm) avec 10g de diesel. Il y a une réduction significative ($p <0,05$) de la longueur des tiges (p-value = 0,000004), au fur et à mesure que le niveau de contamination augmente. De 2,5 à 5g de diesel, la réduction n'est pas significative (même groupe homogène) (tableau 17).

À 2,5g et 5g de diesel, la longueur des tiges a diminué de 10,22% et 15,21% respectivement. Une réduction significative est obtenue à partir de 7,5g (plus de 30%) pour atteindre 51,25% à 10g de diesel. La CE50 pour la croissance des tiges est de 9,795g.

4.1.4. Test de corrélation

Le test de corrélation linéaire de Pearson a révélé que la contamination par le diesel a eu une influence négative sur le pourcentage de germination des graines de *X. strumarium*, une forte influence négative sur la longueur des tiges (0,95) et une influence positive (0,56) sur la longueur des racines (tableau 18 et figure 40). Il existe également une corrélation positive entre la longueur des tiges et le pourcentage de germination (0,88). Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre la longueur des racines et le pourcentage de germination (0,07) (tableau 18 et figure 40).

Tableau 18. Coefficients de corrélation entre les niveaux de contamination, le pourcentage de germination, la longueur racinaire et la longueur de tige

Variable	Contamination	Germination	Tige	Racine
Contamination	1.00	-0.75*	-0.95*	0.56*
Germination	-0.75*	1.00	0.88*	-0.07
Tige	-0.95*	0.88*	1.00	-0.34
Racine	0.56*	-0.07	-0.34	1.00

* Correlations significative ($p<0.05$).

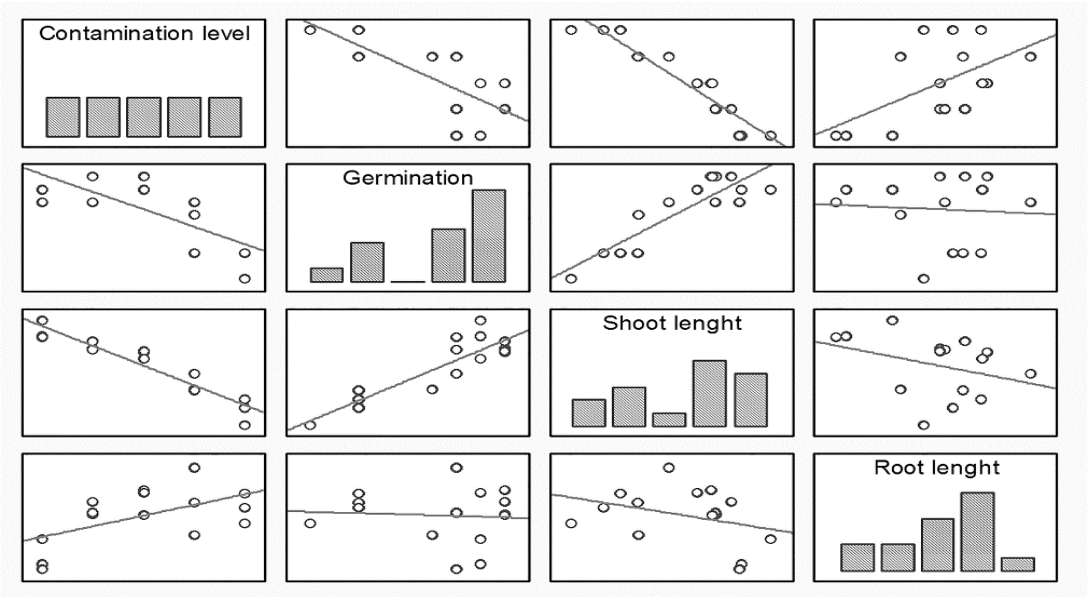


Figure 40. Graphe de corrélation avec les histogrammes des variables (nivaux de contamination, pourcentage de germination, longueur de tige et longueur racinaire)

4.2. Deuxième essai de phytotoxicité (étude comparative)

4.2.1. Germination

Les taux de germination des différentes espèces dans chaque substrat sont présentés dans le tableau 19. Les P-values et les groupes homogènes y sont aussi présentés.

Tableau 19. Taux de germination des différentes espèces dans chaque substrat.

Sols	Espèces	*X. strumarium*	*A. sativa*	*D. carota*	*C. major*
	P-value	***0,035071****	***0,030277****	***0,045323***	***0,049756****
GG	**0%**	91,67±11,79^{a}	85,00±7,07^{a}	55,00±21,21^{a}	55,00±7,07^{a}
GG	**2.5%**	91,67±11,79^{a}	20,00±28,28^{b}	45,00±7,07^{a}	70,00±28,28^{ab}
GG	**5%**	50,00±0,00^{b}	0,00±0,00^{b}	00,00±0,00^{b}	0,00±0,00^{b}
	P-value	***0,464758***	***0,019793****	***0,012075***	***0,012333****
TU	**0%**	66,67±0,00	90,00±0,00^{a}	60,00±0,00^{a}	95,00±7,07^{a}
TU	**2.5%**	83,33±0,00	100,00±0,00^{a}	00,00±0,00^{b}	85,00±7,07^{a}
TU	**5%**	83,33±23,57	75,00±7,07^{b}	30,00±14,14^{c}	30,00±14,14^{b}
	P-value	***0,074132***	***0,137465***	***0,096234***	***0,015822****
SI	**0%**	66,67±0,00	85,00±21,21	75,00±7,07	85,00±21,21^{a}
SI	**2.5%**	91,67±11,79	90,00±14,14	40,00±14,14	55,00±7,07^{a}
SI	**5%**	83,33±0,00	25,00±35,36	25,00±21,21	0,00±0,00^{b}
	P-value	***0,464758***	***0,306454***	***0,961293***	***0,192450***
CH	**0%**	100,00±0,00	90,00±14,14	60,00±0,00	80,00±14,14
CH	**2.5%**	91,67±11,79	75,00±7,07	60,00±28,28	70,00±0,00
CH	**5%**	100,00±0,00	90,00±0,00	65,00±21,21	60,00±0,00

**différences significatives (p<0,05). Les différentes lettres représentent les groupes homogènes.*
GG : Gro Green ; TU : Terreau universel ; SI : Sicoflore ; CH : Chiraz

X. struamrium a des taux de germination très élevés dans tous les substrats et tous les échantillons (Fig. 41), sauf à 5% de contamination au diesel avec du Go Green où ce taux est de 50%. Les taux les plus élevés sont obtenus sur le Chiraz (100% de germination à 5% de contamination). Nous constatons qu'il y a eu des stimulations de la germination à 2,5% pour le TU et le SI et à 5% pour la CH. Par contre, nous avons une inhibition assez importante (50%) à 5% pour le GG.

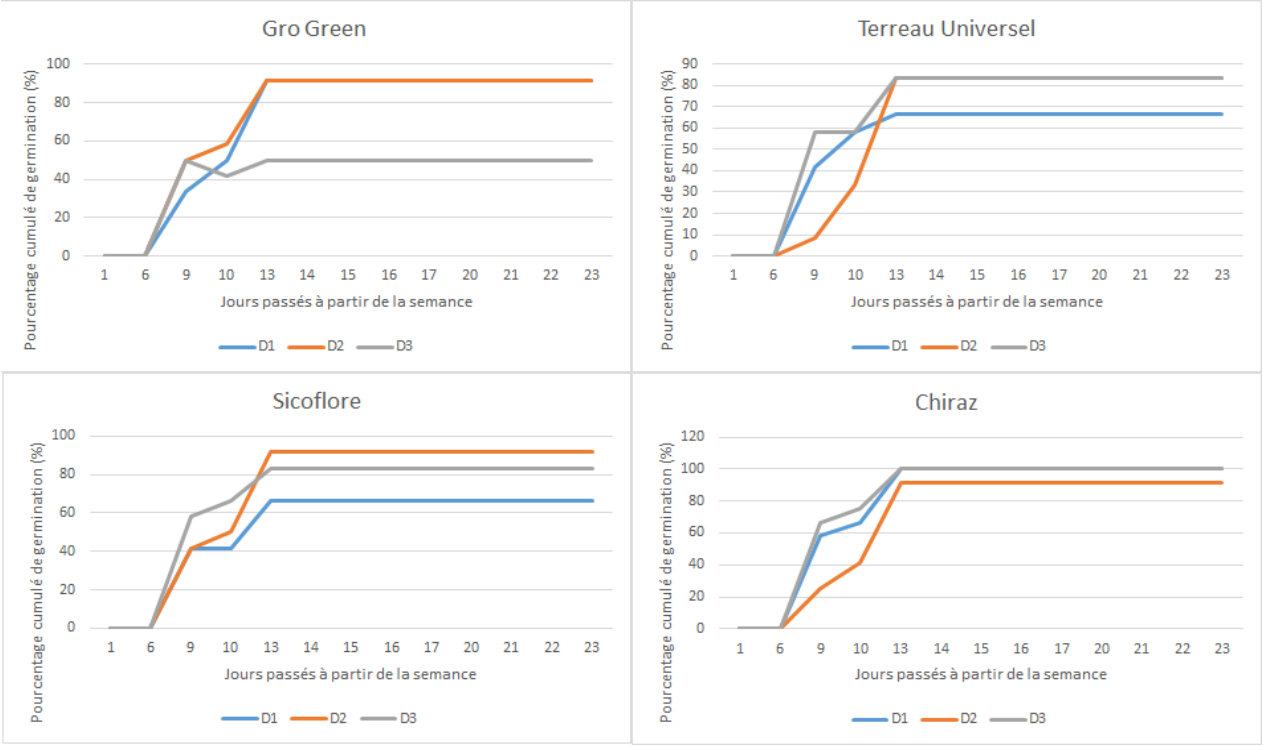


Figure 41. Taux de germination de *X. strumarium*

Pour l'avoine, nous avons enregistré les taux de germination les plus élevés au niveau du TU et de la CH et les plus bas au niveau du GG (Fig. 42). Nous remarquons qu'il y a eu des stimulations de la germination à 2,5% pour le TU et le SI et à 5% pour la CH. Par contre, nous avons une inhibition importante (75%) à 5% pour le SI et un taux nul à 5% pour le GG.

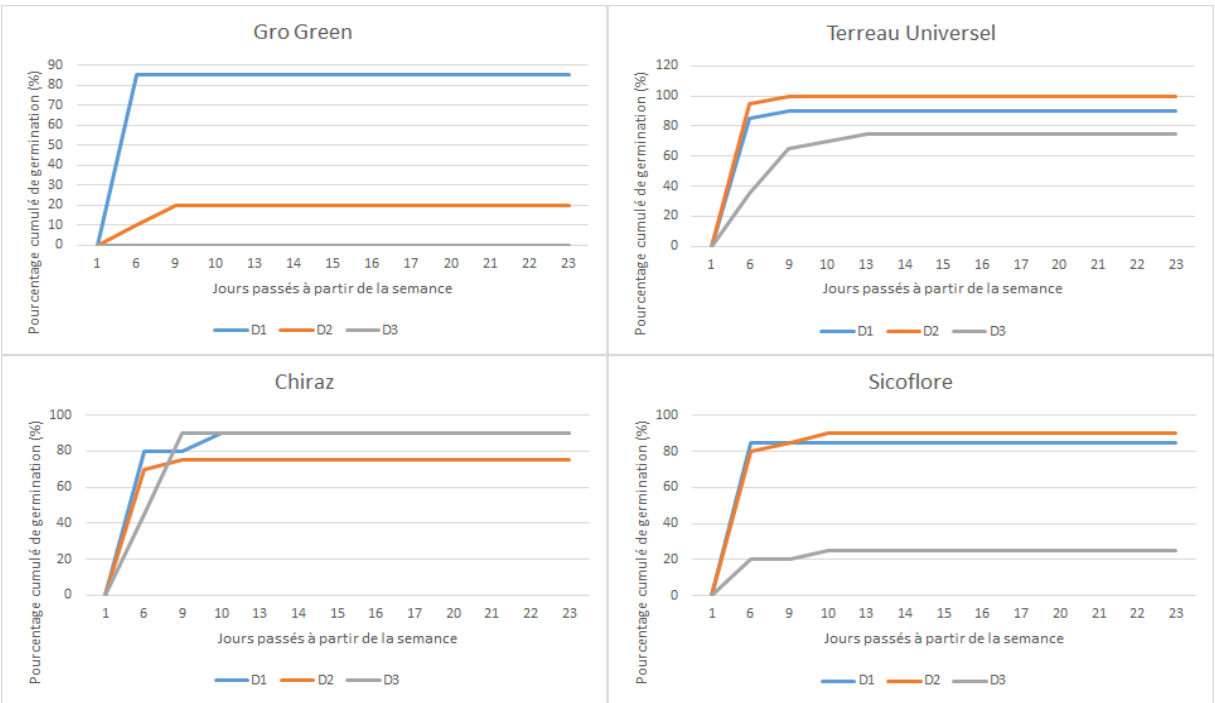


Figure 42. Taux de germination de *A. sativa*

Les taux de germination les plus élevés pour *Daucus carota* sont obtenus au niveau de la CH et les plus bas au niveau du GG. Les plus fortes inhibitions sont à 5% au niveau du GG et du SI, avec 0 et 25% de germination respectivement (Fig. 43). D'une façon générale, il y a eu une inhibition suite aux contaminations dans tous les substrats sauf pour la CH où il y a eu une petite stimulation à 5% de contamination, cette stimulation lui permet même de dépasser de peu le taux de germination au niveau du contrôle.

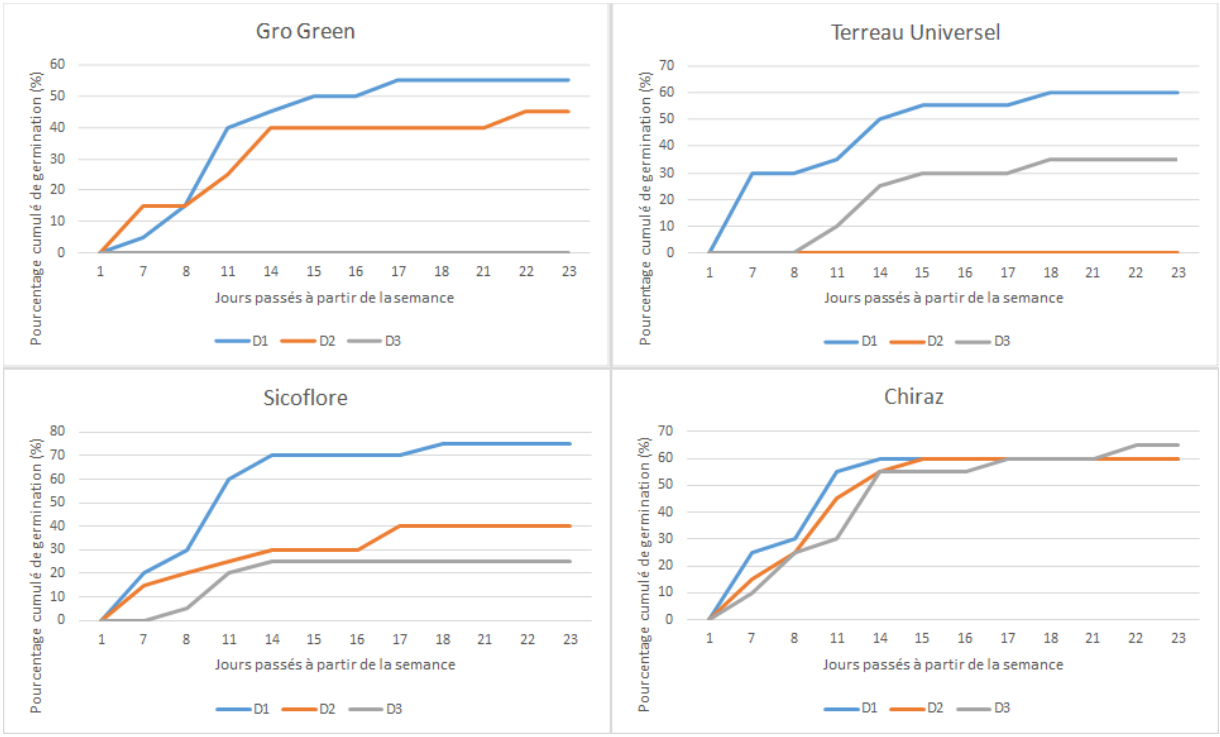


Figure 43. Taux de germination de *D. carota*

Pour la *Cerinthe major*, nous avons enregistré les meilleurs taux de germination au niveau du TU et de la CH (Fig. 44). Des taux de 0% (inhibition totale de la germination) ont été obtenus à 5% de contamination au niveau du GG et du SI. À 5% de contamination, l'inhibition de la germination est beaucoup plus importante au niveau du TU qu'au niveau de la CH. Les taux de germination ont tous été affectés, sauf à 2,5% au niveau du GG.

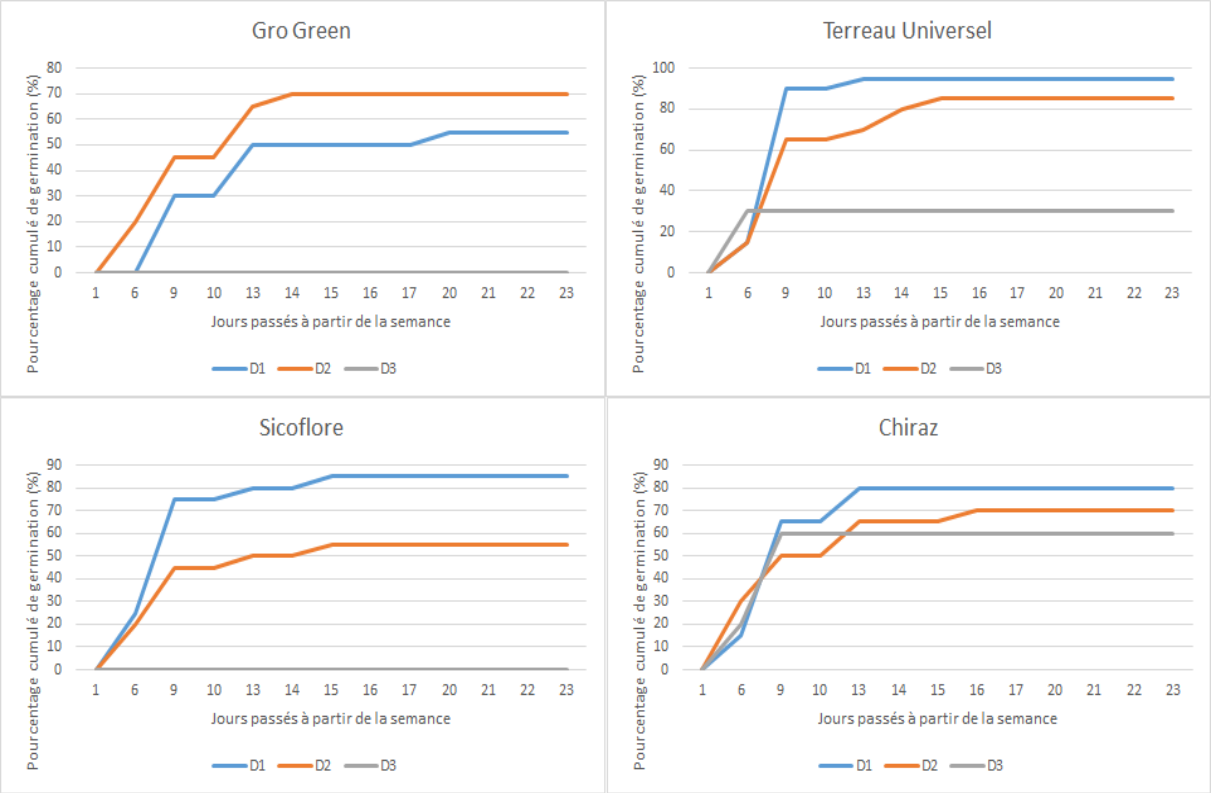


Figure 44. Taux de germination de *C. major*

Au niveau du GG, plus la contamination augmente et plus l'inhibition de la germination augmente. Au niveau du TU et du SI, l'inhibition augmente avec la contamination pour *D. carota* et *C. major*, et il y a une stimulation de la germination à 2,5% puis une forte inhibition à 5% pour les deux espèces *A. sativa* et *X. strumarium*. Pour ce dernier, il n'y a pas eu d'inhibition à 5% au niveau du TU. Au niveau de la CH, nous avons remarqué une inhibition à 2,5% puis une stimulation à 5% pour *X. struamrium* et *A. sativa*, une stimulation à 5% pour *D. carota* et une inhibition à 2,5% et à 5% pour la *C. major*.

Lorsque l'ANOVA couplée au test de Newman et Keuls a révélé des différences significatives, nous remarquons une différenciation soit entre le contrôle et les échantillons contaminés, soit entre 5% de contamination et les autres échantillons. Concernant le type de sol, nous observons une différenciation entre la CH et les autres substrats pour la lampourde (P-valu = 0,0118), le GG et les autres substrats pour l'avoine (P-value = 0,0003), et entre les couples GG-SI et TU-CH pour la Cerinthe (P-value = 0,0023).

4.2.2. Croissance

Pour *X. strumarium*, nous observons une stimulation de la longueur et de la biomasse racinaires au niveau de tous les substrats (tableau 20). Une grande partie des faibles valeurs sont

enregistrées chez les plantes témoins. Cependant, il y a inhibition après la stimulation pour certains substrats (CH à 5% pour la longueur et GG à 5% pour la biomasse). La longueur la plus importante est enregistrée au niveau du TU à 5% de contamination et la biomasse la plus importante au niveau de CH à 5% de contamination. Notons que pour la longueur et la biomasse aérienne, les valeurs les plus élevées sont obtenues au niveau du témoin, excepté le SI, dont la biomasse la plus importante est à 2,5% de contamination.

Nous déduisons que plus la contamination augmente plus la longueur et la biomasse aérienne diminuent. Le TU et la CH sont les substrats où nous avons observé le plus de croissance (surtout à 5% de contamination).

Tableau 20. Résultats des différents paramètres de croissance pour *X. strumarium*

Subsrats	**GG**	**TU**	**SI**	**CH**
Doses	**Longueur racinaire**			
P-value	**0,297678**	**0,493835**	**0,026041***	**0,150710**
0%	15,68±0,22	18,23±5,02	14,81±1,50[a]	19,42±1,70
2,50%	14,67±4,17	18,77±1,82	22,88±1,87[b]	20,72±1,22
5%	19,35±1,44	25,70±9,33	16,33±1,14[a]	15,25±2,92
	Longueur de la tige			
P-value	**0,233209**	**0,331686**	**0,001686***	**0,011346***
0%	16,31±1,78	17,88±0,71	17,59±0,27[a]	18,89±0,34[a]
2,50%	15,07±0,75	15,42±0,88	15,30±0,59[b]	16,27±0,54[b]
5%	12,27±2,59	17,14±2,14	11,40±0,38[c]	15,59±0,48[b]
	Biomasse aérienne			
P-value	**0,000745***	**0,995861**	**0,001252***	**0,109688**
0%	8,61±0,44[a]	6,50±2,55	6,22±0,43[a]	10,69±1,01
2,50%	7,07±0,05[b]	6,34±0,45	7,62±0,23[b]	8,94±1,23
5%	3,35±0,22[c]	6,44±1,82	2,85±0,21[c]	6,98±1,24
	Biomasse racinaire			
P-value	**0,067407**	**0,110812**	**0,003803***	**0,512674**
0%	1,98±0,08	2,13±0,14	1,53±0,08[a]	4,18±0,60
2,50%	3,02±0,59	3,31±0,19	4,20±0,42[b]	4,66±0,53
5%	1,74±0,10	3,38±0,73	1,86±0,16[a]	4,78±0,28

**différences significatives*

Les différentes lettres représentent les groupes homogènes

Pour *A. sativa*, la longueur et la biomasse racinaires ont été négativement affectées par la contamination (tableau 21). Une stimulation a cependant été enregistrée à 2,5%, pour la longueur au niveau du SI et pour la biomasse au niveau du SI et du TU. La longueur et la biomasse de la partie aérienne sont négativement affectées, excepté à 2,5% au niveau du TU et du SI pour la longueur de la tige, où nous avons observé une stimulation. Le TU et la CH sont les substrats ayant obtenu le plus de croissance alors que le GG est celui où les inhibitions ont été les plus importantes en particulier à 5% de contamination au diesel.

Tableau 21. Résultats des différents paramètres de croissance pour *A. sativa*

Substrats	**GG**	**TU**	**SI**	**CH**
	Longueur racinaire			
P-value	**0,091914**	**0,031673***	**0,566660**	**0,003188***
0%	11,40±1,86	15,98±1,73^{a}	9,75±10,54	19,36±0,04^{a}
2,50%	3,93±5,55	15,83±0,06^{a}	11,72±1,12	13,90±0,39^{b}
5%	0,00±0,00	11,33±0,34^{b}	3,92±5,54	10,12±1,33^{c}
	Longueur de la tige			
P-value	**0,405719**	**0,020363***	**0,204196**	**0,006249***
0%	2,53±0,23	2,16±0,36^{a}	3,92±0,15	5,72±0,34^{a}
2,50%	2,10±2,97	5,77±0,58^{b}	5,16±0,25	4,49±0,14^{b}
5%	0,00±0,00	3,00±0,83^{a}	1,76±2,49	3,29±0,26^{c}
	Biomasse aérienne			
P-value	**0,004040***	**0,001001***	**0,045622***	**0,748358**
0%	4,90±0,29^{a}	5,86±0,06^{a}	2,67±0,21^{ab}	2,09±0,29
2,50%	0,58±0,81^{b}	2,24±0,47^{b}	2,50±0,23^{a}	1,98±0,42
5%	0,00±0,00^{b}	1,35±0,06^{c}	0,59±0,83^{b}	1,80±0,37
	Biomasse racinaire			
P-value	**0,078127**	**0,380355**	**0,030281***	**0,112679**
0%	1,63±0,08	1,59±0,61	2,26±0,48^{a}	3,09±0,28
2,50%	0,55±0,78	2,64±1,53	2,98±0,26^{a}	2,25±0,52
5%	0,00±0,00	1,10±0,09	0,46±0,65^{b}	1,55±0,61

**différences significatives*

Les différentes lettres représentent les groupes homogènes

Pour *D. carota*, la longueur et la biomasse racinaire sont négativement affectées par la contamination sauf au niveau du SI à 2,5% pour la longueur et au niveau de la CH à 2,5% et 5% de contamination pour la biomasse (tableau 22). La longueur et la biomasse aérienne ont été négativement influencées par la contamination. En effet, presque toutes les valeurs élevées

ont été enregistrées au niveau des contrôles. Les meilleures valeurs pour la croissance ont été observés au niveau du TU et du CH, et les valeurs les plus faibles au niveau du GG.

Tableau 22. Résultats des différents paramètres de croissance pour *D. carota*

Substrats	**GG**	**TU**	**SI**	**CH**
Doses	**Longueur racinaire**			
P-value	**0,036036***	**0,044900***	**0,064801**	**0,024916***
0%	5,20±1,87[a]	1,78±0,11[a]	5,89±2,42	2,14±0,37[a]
2,50%	1,31±0,63[ab]	0,00±0,00[ab]	1,53±0,05	1,65±0,16[b]
5%	0,00±0,00[b]	1,68±0,32[b]	0,95±1,34	1,71±0,09[b]
	Longueur de la tige			
P-value	**0,040195***	**0,004562***	**0,095501**	**0,225334**
0%	2,54±0,41[a]	1,47±0,19[a]	2,57±0,61	0,50±0,00
2,50%	0,27±0,09[b]	0,00±0,00[b]	0,33±0,24	0,56±0,31
5%	0,00±0,00[b]	0,25±0,35[a]	0,33±0,47	0,25±0,00
	Biomasse aérienne			
P-value	**0,028438***	**0,005738***	**0,323583**	**0,562993**
0%	0,04±0,01[a]	0,12±0,01[a]	0,18±0,01	0,05±0,00
2,50%	0,05±0,01[a]	0,00±0,00[b]	0,05±0,02	0,06±0,01
5%	0,00±0,00[b]	0,10±0,02[a]	0,09±0,13	0,07±0,02
	Biomasse racinaire			
P-value	**0,043935***	**0,010293***	**0,547092**	**0,421875**
0%	0,13±0,05[a]	0,07±0,01[a]	0,08±0,01	0,07±0,01
2,50%	0,11±0,01[a]	0,00±0,00[b]	0,06±0,03	0,09±0,01
5%	0,00±0,00[b]	0,05±0,01[a]	0,04±0,05	0,10±0,03

**différences significatives*

Les différentes lettres représentent les groupes homogènes

Pour *C. major*, concernant la longueur racinaire, il y a eu une stimulation à 2,5% et 5% pour la CH, une inhibition progressive pour le TU et une stimulation à 2,5% pour le SI et le GG (tableau 23). Cependant, pour ces derniers, nous avons observé une inhibition totale à 5%. Pour la biomasse racinaire, les plus fortes valeurs sont enregistrées à 2,5% de contamination. À 5% de contamination pour le GG et le SI, les valeurs sont nulles.

Pour la longueur et la biomasse aériennes, elles ont été négativement affectées et nous avons obtenu des valeurs nulles à 5% de contamination au niveau du SI et du GG. Le TU et la CH se distinguent encore une fois avec de meilleures valeurs de croissance, alors que le GG affiche les inhibitions les plus fortes.

Tableau 23. Résultats des différents paramètres de croissance pour *C. major*

Subsrats	**GG**	**TU**	**SI**	**CH**
Doses	**Longueur racinaire**			
P-value	**0,013382***	**0,020153***	**0,042648***	**0,104759**
0%	5,17±0,41[a]	13,67±1,80[a]	8,60±3,38[a]	7,65±2,64
2,50%	8,44±2,04[a]	7,08±0,56[b]	10,61±2,50[a]	8,66±2,13
5%	0,00±0,00[b]	6,60±1,20[b]	0,00±0,00[b]	13,66±0,55
	Longueur de la tige			
P-value	**0,000655***	**0,051072**	**0,003413***	**0,019372***
0%	11,00±0,66[a]	13,67±1,80	11,67±1,66[a]	9,44±1,11[a]
2,50%	7,05±0,71[b]	4,42±3,20	8,43±0,78[a]	6,43±0,36[b]
5%	0,00±0,00[c]	6,60±1,20	0,00±0,00[b]	5,36±0,15[b]
	Biomasse aérienne			
P-value	**0,010666***	**0,005311***	**0,002379***	**0,015211***
0%	4,61±0,08[a]	13,96±1,86[a]	7,45±0,47[a]	6,33±0,85[a]
2,50%	2,62±1,04[b]	3,95±0,93[b]	2,89±0,90[b]	3,46±0,59[b]
5%	0,00±0,00[c]	1,55±1,05[b]	0,00±0,00[c]	2,43±0,07[b]
	Biomasse racinaire			
P-value	**0,005391***	**0,376207**	**0,019190***	**0,601698**
0%	0,17±0,08[a]	0,83±0,52	1,03±0,04[a]	2,06±0,88
2,50%	0,89±0,15[b]	1,49±0,07	2,27±0,63[b]	2,87±0,93
5%	0,00±0,00[a]	1,06±0,46	0,00±0,00[a]	2,67±0,35

**différences significatives*

Les différentes lettres représentent les groupes homogènes

Dans l'ensemble, nous avons observé les meilleures valeurs de croissance au niveau de la CH et du TU, surtout au niveau de la contamination à 5%, où ils se distinguent très clairement par rapport aux autres substrats. Le SI et le GG ont donné quelques bons résultats à 2,5% de contamination pour ce qui est de la longueur et de la biomasse racinaire. Le GG est clairement le substrat présentant les inhibitions les plus importantes, surtout à 5% de contamination.

X. strumarium est l'espèce la plus résistante aux différentes contaminations. De plus, c'est l'espèce qui s'adapte le mieux aux différents substrats. Ainsi, par exemple, les longueurs et biomasses racinaires et aériennes sont complètement nulles à 5% de contamination au niveau du GG pour toutes les espèces sauf *X. strumarium*. Ce dernier est aussi l'espèce ayant présenté le meilleur rendement (longueurs et biomasses racinaires et aériennes). Les deux seules inhibitions dépassant les 50% pour *X. strumarium* sont observées au niveau du GG et du SI à 5% pour le paramètre biomasse aérienne.

Les tests d'ANOVA couplés au test de Newman et Keuls révèlent, dans beaucoup de cas, des différences entre le contrôle et les échantillons contaminés, entre 5% de contamination et les autres échantillons, ou encore entre tous les échantillons. Pour le paramètre sol, nous observons beaucoup de différenciation entre le GG, la CH ou le TU et les autres substrats, et entre la CH-TU d'un côté et le SI-GG d'un autre côté.

Discussion

1. Etude du réseau de distribution de carburant au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou

Il ressort de cette étude que la majorité des stations-services (84%) sont gérées par des privés et 16% sont gérées par l'entreprise étatique Naftal. Ces taux sont un peu différents quand on regarde les chiffres au niveau national, ainsi en 2017 le nombre de stations-service au niveau national a atteint 2 440 stations, et 683 (28%) appartiennent à l'entreprise étatique Naftal (Ministère de l'Énergie, 2017). Les capacités de stockage suivent la même tendance, avec 83% pour les privés et 17% pour Naftal. La tendance est à l'augmentation pour le nombre de stations-services, il n'y a presque jamais de fermetures, sauf pour des raisons règlementaires.

Le diesel est le carburant le plus consommé, suivi par l'essence et le GPL/C, ce qui correspond à la tendance au niveau national. L'utilisation de ce dernier est encouragée par l' État, cependant son développement est limité par les capacités de conversion limitées. À la fin de l'année 2017, le GPL/C marque le taux d'évolution le plus remarquable, 29% selon les chiffres du ministère de l' Énergie, par contre, le diesel et le total des essences marquent un recul par rapport à 2016.

Le mois de décembre est le mois où la consommation de carburant est la plus faible, avec un total de 5742,67M^3 et le mois d'août est le mois où la consommation de carburant est la plus forte, avec un total de 8133,55M^3. Ceci serait dû au fait que ce mois coïncide avec une période de vacances, impliquant un très fort trafic automobile.

Nous observons qu'à partir de 30 000 habitants, toutes les communes disposent de stations-services. La commune de Tizi-Ouzou est la mieux équipée en matière de nombre de stations avec au total 12 stations-services, ceci est dû au fait qu'elle présente la plus forte population de la wilaya (135 088 habitants) et un réseau routier dense.

Les communes dont le nombre d'habitants est compris entre 10 000 et 20 000 comptabilisent le plus grand nombre de stations (31), chose due au fait que cet intervalle présente le plus grand nombre de communes (27 au total). Par contre le nombre le plus faible de stations est représenté au niveau de la tranche inférieure à 5 000 habitants (pour 6 communes, il y a 2 stations).

Il ressort de l'analyse spatiale, qu'il y a une répartition de stations-services (essentiellement privées) assez étendue sur tout le territoire. Cependant, certaines zones sont beaucoup mieux équipées, ces zones sont surtout localisées au niveau central de la wilaya, aux environs

notamment de la commune de Tizi-Ouzou. Ceci est notamment dû au fait que la commune de Tizi-Ouzou présente une très forte densité de population (135 088 habitants) et aussi au passage de la RN 12 par le centre de la wilaya, impliquant de ce fait un important trafic routier. Faleet (2017) a démontré une corrélation directe entre le nombres de stations-services et la densité de population.

Les zones à forte densité de population sont très équipées en stations-services, de ce fait, en cas d'accident (incendie, explosion…), les conséquences peuvent être graves vu les enjeux impliqués (forte population).

Nous retenons aussi que les zones périphériques de la wilaya sont les moins équipées en stations-services, les communes dépourvues de stations-services sont majoritairement situées à la périphérie de la wilaya, près des frontières avec les wilaya voisines, dans des zones montagneuses, surtout du côté Est et Sud de la wilaya. Nos résultats sont assez similaires à ceux obtenus par Hiegel (1999).

Notre travail a permis de réaliser une première étape dans l'inventaire des installations qui peuvent présenter un risque potentiel, à la fois pour l'environnement, pour la santé de l'homme, et aussi un risque du point de vue technologique et industriel.

2. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la végétation

Les analyses des TPH pour le site 3 et les analyses qualitatives pour les sites 1 et 2 ont montré que les sols à proximité des 2 stations-services sont contaminées par des hydrocarbures pétroliers. Ces analyses ont montré que plus on s'éloigne des sources de rejets plus la contamination s'atténue. Plusieurs auteurs ont rapporté la présence de contaminations du sol à proximité de stations-services. Cette pollution serait due la plupart du temps à des déversements de carburants et des fuites au niveau des cuves de stockage de carburants (Borowiec *et al.,* 2008 ; Moschini *et al.,* 2005 ; Parvizi Mosaed *et al.,* 2015). Dans les 2 stations que nous avons étudiées, les rejets sont principalement dus à des déversements de carburants, au lavage de l'aire de distribution et à des huiles usagées au niveau de la station d'Idjeur.

La règlementation à travers notamment le décret N°09-209 impose les limites maximales de la teneur en substances nocives des eaux usées autres que domestiques. Cette limite pour les hydrocarbures totaux est de 10mg/L. Les rejets dont il est question au niveau des 2 stations ne font l'objet d'aucun traitement préalable. Le problème se situe notamment au niveau de la récupération des effluents. En effet, les systèmes de récupération des eaux au niveau des 2 stations ne sont pas optimaux, laissant une quantité d'effluents liquides quitter les stations au lieu d'être dirigée vers les décanteurs, où les huiles sont séparées de l'eau puis récupérée.

Les rejets des stations ont impacté positivement les taux de carbone et d'humidité, ces derniers ont vu leurs valeurs augmenter en se rapprochant des sources de rejets. Le pH en revanche semble avoir été négativement influencé au niveau des sites 1 et 2. Akpan et Udoh (2013) ont rapporté une acidification du sol et une augmentation des taux de carbone après contamination par le diesel. Les rejets des stations-service sont composés en partie d'eau, ce qui explique l'augmentation des taux d'humidité. Le rapport C/N a été altéré par la contamination, ce qui a entraîné une augmentation de ce rapport dans la zone 1 et une diminution en allant vers la zone 4. Adam et Duncan (2003) ont signalé que des modifications du rapport C/N peuvent avoir un impact négatif sur le développement de la végétation. En effet l'apport de carbone par les hydrocarbures a comme conséquence de stimuler l'activité microbienne, rendant l'azote non disponible pour les plantes, altérant ainsi leur croissance.

Dans les stations-services concernées par nos études, le diesel est le produit le plus présent. Le diesel fait partie des hydrocarbures lourds, ces derniers ont des effets toxiques plus importants sur la croissance et la germination des plantes par rapport aux hydrocarbures légers (Labud *et al.,* 2007).

La contamination a modifié la structure de la végétation dans les 3 sites, plus on s'éloigne de la source de pollution, plus la densité de la végétation devient importante. Le nombre d'individus total augmente avec l'éloignement de la source de pollution, la zone 1 (zone la plus polluée) étant la plus pauvre en nombre d'individus. Des observations similaires ont été rapporté par d'autres auteurs tel que Colin *et al.,* (2000) et Dazy *et al.,* (2009).

Le coefficient de Sorensen–Dice a montré que les différences les plus importantes se situent entre les zones 1 et 4 et les zones 2 et 4. La contamination a créé une différenciation entre les zones les plus proches de la source de pollution (zones 1 et 2) et la zone non polluée (zone 4).

De nombreuses études ont montré les effets négatifs de la contamination par les hydrocarbures sur la croissance et la germination des espèces végétales, nous citerons Adam et Duncan (2002), Luhach et Chaudhry (2012), Ogbo (2009). Ces études ont également révélé que les effets dépendent des espèces végétales. En effet, les espèces ne réagissent pas toutes de la même manière à une contamination. Ceci est conforme à nos observations, nous avons ainsi remarqué que la contamination affecte la richesse en espèces, en particulier dans la zone 1, la zone la plus pauvre en espèces et la plus proche de la source de contamination. Certaines espèces végétales ont réussi à s'établir dans les zones polluées, telles que *Xanthium strumarium, Avena sp, Conium maculatum* et *Oxalis pes-caprae*. D'autres espèces ont été peu ou pas retrouvées dans les zones contaminées, telles que *Beta vulgaris, Senecio vulgaris, Malva sylvestris, Sonchus oleraceus, Galactites tomentosa* et *Scolymus hispanicus*.

Le premier lot d'espèces pourrait contenir de potentiels candidats pour la phytoremédiation des sites contaminés par des hydrocarbures. Gulezian *et al.,* (2012) ont signalé la tolérance de *Conium maculatum* à la contamination par les métaux et les HAP. Frick *et al.,* (1999) ont rapporté qu'*Avena sativa* est une espèce tolérante aux hydrocarbures. L'examen des sols à proximité de raffineries a permis de constater que des espèces telles que la luzerne et le trèfle dominent autour des unités de distillation et des bacs de stockage des produits lourds (Bergue et Mérienne, 1986). *Xanthium strumarium*, une espèce végétale capable de croître dans de nombreux habitats (Weaver et Lechowicz, 1983), a préféré les zones 1, où la pollution est la plus importante. Cette espèce semble avoir une bonne capacité d'établissement dans des environnements contaminés par des hydrocarbures. *X. strumarium* a déjà été recommandée pour la dépollution de métaux (Khalid *et al.*, 2018 ; Singh *et al.*, 2016).

Xanthium strumarium, *Avena sp*, *Conium maculatum* et *Oxalis pes-caprae* sont des plantes adventices, considérées dans certaines parties du monde comme des espèces envahissantes

(Castro *et al.*, 2007 ; Nakova *et al.*, 2004 ; Sharma *et al.*, 2010 ; Vetter, 2004). Hierro *et al.*, (2006) ont suggéré que les activités humaines peuvent augmenter les invasions d'espèces. Il est donc possible que les changements induits par la contamination aient contribué à l'établissement des espèces adventices. La contamination a modifié certaines propriétés physico-chimiques des sites, défavorisant ainsi les espèces les plus exigeantes et favorisant l'installation de quelques espèces adventices.

Xanthium strumarium se distingue clairement des autres espèces, elle a surtout été retrouvé dans la zone 1 (la plus proche des sources de rejets). De ce fait, cette espèce a été choisie pour faire l'objet de tests de phytotoxicité avec du diesel comme polluant.

3. Investigation des effets des rejets de stations-services sur la faune

La réaction des espèces d'invertébrés à une contamination du sol dépend de nombreux facteurs, comme le comportement spécifique de chaque espèce sous le stress causé par la pollution et sa capacité à la tolérer. Il peut donc exister une différence entre les communautés d'invertébrés vivant dans des sols pollués et celles vivants dans des sols non polluées (Van Straalen, 2004). Il est démontré que les Isopoda et les Hymenoptera peuvent tirer parti des niveaux élevés de contamination (Faulkner et Lochmiller, 2000). Ainsi, ces deux ordres ont été retrouvés en grand nombre dans certaines zones polluées. Les isopodes ont montré une préférence pour la zone 1. Ces derniers auraient des capacités considérables pour la biotransformation des substances dérivées du pétrole et une faible sensibilité à la pénétration de ces substances à travers les téguments (Gospodarek *et al.,* 2019). Cependant, les Hymenoptera ont été négativement influencés dans la première zone, où nous avons observé leurs plus faibles valeurs. Il est donc possible que les fourmis soient favorisées dans les zones modérément polluées, alors qu'elles sont négativement affectées dans les zones fortement polluées. Les Stylommatophora sont connus pour leur capacité de bioaccumulation et sont utilisés comme bio-indicateurs (Oehlmann et Schulte-Oehlmann, 2003). Ainsi, cet ordre a montré les plus grandes valeurs au niveau de la zone 1 et de la zone 4 pour la méthode d'extraction par laquelle nous avons enregistré un grand nombre d'individus, par contre pour la méthode des pots Barber en Mai, nous avons enregistré les plus grandes valeurs au niveau des zones 4 et 3. García-Segura *et al.,* (2018) de leur côté ont observé que les populations de Gastéropodes ont diminué avec l'augmentation des concentrations en TPH. La répartition des Stylommatophora pourrait mieux s'expliquer en allant vers les niveaux systématiques inférieurs (familles, espèces).

Eom *et al.,* (2007), ont testé la toxicité de quelques échantillons de sol provenant d'un ancien site de cokerie pollué par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sur des vers de terre (*Eisenia fetida*) et des collemboles (*Folsomia candida*), les résultats ont indiqué de sévères effets sur la survie et la reproduction des deux espèces. Le comportement des espèces varie beaucoup dans un milieu pollué, certaines espèces de collemboles, par exemple, évitent la contamination alors que d'autres espèces sont attirées par la contamination (Gass *et al.,* 2006). Ainsi, les vers de terre ont été négativement affectés dans les 2 premières zones, et les collemboles ont été influencés négativement dans la première zone (la plus proche de la source de pollution). Il a été observé des valeurs plus grandes pour le paramètre nombre d'individus au niveau des zones 2 et 3 comparés à la zone 4, il semblerait donc que les collemboles soient favorisés dans les zones modérément polluées, tout comme les Hymenoptera, alors qu'elles

sont négativement affectées dans les zones fortement polluées. De leur côté, García-Segura *et al.,* (2018) ont rapporté que les densités (individus/m^2) des fourmis et des vers de terre ont augmenté avec l'augmentation des TPH.

Les Parasitiformes et la Coleoptera semblent être impactés beaucoup plus dans la zone 1 et les valeurs les plus élevées ont été parfois observés dans les zones 2 et 3. García-Segura *et al.,* (2018) ont observé que les acariens avaient présenté la densité la plus importante dans les zones moyennement contaminées comparées au contrôle et aux zones hautement contaminées, et que ces dernières ont présenté les densités les plus faibles.

Les Araneae présentent toujours les valeurs les plus importantes au niveau des zones 3 et 4. Il semble donc qu'elles évitent les zones les plus proches de la source de rejets. Rusin et Gospodarek (2016) ont rapporté que les substances dérivées du pétrole dans la plupart des cas n'ont pas d'effets négatifs sur le nombre des araignées.

Les Chilopoda ont montré les valeurs les plus élevées dans la zone 4, alors que les Diplopoda ont montrés les valeurs les plus faibles dans la zone 4. Jaworska et Gospodarek (2007) ont observé que les produits pétroliers n'avaient pas d'effets négatifs sur l'occurrence des Diplopoda et des Chilopoda.

Notre étude a révélé que le nombre d'individus est plus important soit au niveau de la zone non polluée (zone 4), soit au niveau des zones du milieu (zones 2 et 3), par contre, la zone 1 présente toujours le nombre d'individus le plus faible, sauf pour la zone 1 du transect 2 pour la méthode d'extraction, où nous avons observé un nombre très élevé de Stylommatophora.

L'abondance de la mésofaune a été plus importante dans les zones modérément contaminées (en comparaison avec les zones contrôle et les zones très contaminées) (García-Segura *et al.,* 2018). Nous avons observé certains résultats qui vont dans ce sens. Certains ordres semblent avoir été négativement influencé dans la zone la plus proche du point de rejet (zone 1), alors qu'ils ont été parfois favorisés par les zones moyennes (zones 2 et 3). Ces ordres sont les Entomobryomorpha, les Hymenoptera, les Parasitiformes et les Coleoptera. D'autres ordres ont montré des valeurs élevées pour la zone 1, tel que les Isopodes et les Stylommatophora.

La diversité (pour la mésofaune et la macrofaune) est plus grande dans les zones moyennement contaminées comparées au contrôle et aux zones hautement contaminées (García-Segura *et al.,* 2018). Le nombre d'ordres n'a pas montré une tendance particulière qui pourrait suggérer une influence par la contamination, et ceci pour toutes les méthodes, nous pensons que pour

apercevoir les effets de la contamination, il faudrait aller vers les rangs systématiques inférieurs (familles, espèces).

En outre, il existe d'autres paramètres à prendre en compte, tels que les relations entre la structure de la végétation et les invertébrés. Il a été démontré que certains groupes d'invertébrés tels que les coléoptères, les insectes phytophages, sont étroitement liés à la structure de la végétation et à la diversité des espèces végétales (Chenchouni *et al.*, 2015). La répartition de certains groupes, comme les Coleoptera et les Hemiptera pourrait s'expliquer, en partie, par la couverture végétale, qui est plus importante dans les zones 4 et 3, suivie respectivement des zones 2 et 1. La répartition des Araneae pourrait également être, en partie, liée à la répartition des hémiptères, car ce sont des prédateurs de ces insectes. Blakely *et al.*, (2002) ont reporté de faibles corrélations entre les HAP et certains groupes d'invertébrés dans des sols contaminés par du créosote, il y avait, cependant, une meilleure corrélation avec des facteurs physiques du sol, suggérant que les HAP influent sur les invertébrés du sol non pas par une toxicité directe, mais par un effet sur la structure de l'habitat et la disponibilité de la nourriture. Ainsi, les communautés d'invertébrés peuvent être directement affectées par la contamination et indirectement par les modifications de la structure de la végétation et des propriétés du sol produites par la contamination.

4. Essais de phytotoxicité sur quelques espèces végétales

4.1. Premier essai de phytotoxicité

Xanthium strumarium a montré une tolérance à la contamination par le diesel, germant avec succès à différents niveaux de contamination. Le pourcentage le plus élevé de germination (97%) a été obtenu avec 5g de diesel. Et ses racines ont été influencées positivement par la contamination au diesel. Ainsi, *X. strumarium* peut être proposé comme candidat potentiel pour la phytoremédiation des sols contaminés par le diesel. Des espèces végétales à système racinaire fibreux (telles que les graminées) et des plantes fixant l'azote (telles que les légumineuses), susceptibles d'améliorer la biodégradation des produits pétroliers, ont été utilisées pour la phytoremédiation (G. Adam et Duncan, 1999). Une espèce végétale tolérante ne conviendra pas nécessairement à la phytoremédiation, car elle pourrait ne pas avoir les caractéristiques requises. Cependant, il est essentiel de sélectionner des plantes capables de germer et de croître sur des sites contaminés. Les tests de phytotoxicité sont utiles car ils peuvent éliminer les espèces végétales incapables de se développer en présence de contamination (Kirk *et al.*, 2002).

Les résultats ont montré que des niveaux élevés de contamination par le diesel (7,5g et en particulier 10g) ont affecté la germination de *X. strumarium*. Les effets de la contamination par le diesel sur la germination de nombreuses espèces ont été mis en évidence dans différentes études. Bona *et al.* (2011) ont montré que le pourcentage de germination de *Schinus terebinthifolius* Raddi diminue de manière significative en présence de contamination par le diesel (seulement 29,6% des graines ont germé dans un sol contaminé avec 92,4ml de diesel par kg de sol 30 jours avant la plantation). Les niveaux élevés de contamination par le carburant diesel ont retardé et ont réduit la germination des graines. Amakiri et Onofeghara (1984) expliquent ce phénomène en faisant référence aux propriétés chimiques et physiques du produit pétrolier. La germination peut être affectée par de nombreux paramètres, tels que la réduction des échanges d'oxygène et d'eau lorsque les graines sont entourées de carburant diesel et la toxicité due aux fractions légères du carburant diesel (Gillian Adam et Duncan, 2002). L'embryon peut également être endommagé lorsqu'il est exposé aux polluants (Amakiri et Onofeghara, 1984). Les graines de *X. strumarium* sont enfermées dans une capsule, et ce dernier pourrait offrir une protection supplémentaire contre le diesel, ceci pourrait expliquer, en partie, la tolérance de cette espèce végétale à la contamination par le diesel.

Les résultats ont, également, mis en évidence une réduction significative (P-value = 0,000004) de la longueur des tiges lorsque le niveau de contamination au diesel augmente. Ogbo (2009) a signalé un résultat similaire, constatant une réduction de la longueur des tiges de deux plantes

cultivées suite à la contamination par le diesel : à 5% de diesel, la longueur des tiges de maïs a été réduite de 87,11% et celle du *Sorghum bicolor* a été réduite de 43,12%. Molina-Barahona *et al.,* (2005) ont signalé que le transfert d'alcanes à longue chaîne vers les parties aériennes de la plante pourrait entraîner une réduction de la longueur de la tige. Selon Adam et Duncan (2002), la croissance de la plante peut être affectée par l'altération du rapport C/N suite à la contamination aux hydrocarbures. La longueur des tiges a été principalement affectée par les niveaux de contamination élevés (7,5 et 10g de diesel) ; les niveaux inférieurs ont causé une réduction beaucoup moins importante.

Les résultats ont montré des tendances différentes entre les longueurs des racines et des tiges. La contamination par le diesel a stimulé la longueur des racines de *X. strumarium*. Même s'il y a une réduction de la longueur des racines à 7,5g et 10g, elle reste supérieure aux racines témoins et celles ayant poussé avec 2,5g de diesel. Cette réduction n'est pas significative selon les tests statistiques. Selon Adam et Duncan (1999), dans le cas d'inexistence de sol non contaminé, les racines se développent dans les zones contaminées jusqu'à ce qu'elles trouvent une zone de sol non contaminée.

Les valeurs des CE50 ont montré que la germination est le paramètre le plus sensible (8,880), suivi de la croissance des tiges (9,795) et de la croissance des racines (0,091). La croissance des racines a été plutôt stimulée qu'inhibée.

La contamination par les hydrocarbures induit une réduction de la longueur des racines selon la bibliographie. Tang *et al.,* (2011) ont montré que l'élongation des racines est sensible à la contamination par les hydrocarbures pétroliers ; la croissance des racines était inhibée de 40% chez le maïs et de 30% chez le blé à une teneur en TPH de 0,5%. Cette inhibition augmentait avec l'augmentation du niveau de contamination. Cependant, dans notre expérience, la contamination par le carburant diesel a eu une influence positive sur les racines de *X. strumarium*. Maliszewska-Kordybach et Smreczak (2000) ont observé une certaine stimulation de la longueur des racines dans des sols contaminés par des HAP ; certaines racines de plantes n'ont été stimulées qu'à des niveaux de pollution faibles, alors que d'autres ont toléré des niveaux de pollution élevés (les longueurs des racines de maïs et de haricot par exemple ont été stimulées à 10mg de HAP/1kg de sol ; tableau 24).

Ainsi, *X. strumarium* semble pouvoir tolérer des niveaux de contamination de diesel élevés, ce qui n'est pas surprenant. En effet, la famille des astéracées (à laquelle appartient *X. strumarium*) est utilisée pour la bioremédiation de plusieurs contaminants (Nikolić et Stevović, 2015), et a

montré une capacité de stimulation de la dissipation des HAP (Olson *et al.* 2007). De nombreuses espèces d'Asteraceae ont été recommandées pour la bioremédiation des métaux. Celles-ci incluent, *Cousinia bijarensis*, *Scariola orientalis* et *Cirsium congestum* (Nouri *et al.*, 2009) ; *Helianthus annuus* et *Helianthus tuberosus*, qui sont particulièrement utiles pour l'assainissement des sites industriels contaminés (Gawronski and Gawronska, 2007) ; et *X. strumarium* elle-même, qui convient à la phytoremédiation des métaux (Khalid *et al.*, 2018 ; Singh *et al.*, 2016). Dans cette étude, l'expérience s'est terminée au bout de 14 jours, ce qui limite les résultats obtenus. Un test de phytoremédiation fournirait une perspective intéressante.

Tableau 24. Effets des HAP sur la longueur racinaire de quelques espèces *(Maliszewska-Kordybach et Smreczak, 2000)* comparé à nos résultats

HAP (mg/kg)	Blé (cm)	Avoine (cm)	Maïs (cm)	Haricot (cm)	*X. strumarium* (cm)
0	15.4	10.7	12.6	5.5	12.89^{a} (0g)
1	15.4	11.2	13.1	5.5	18.71^{b} (2,5g)
10	16.2	10.9	16.3*	6.7*	19.92^{b} (5g)
50	15.4	11.9	14.8	5.0	19.87^{b} (7,5g)
100	9.7*	9.7	12.4	4.3*	19.22^{b} (10g)

* Corrélations significatives ($p<0.05$) ; a, b : groupes homogènes.

Xanthium strumarium a montré une bonne germination à certains niveaux de contamination par le carburant diesel. Cependant, des niveaux élevés de contamination (7,5 et 10g de diesel pour 100g de substrat) ont retardé et ont réduit la germination. La longueur de la tige a été affectée négativement, en particulier, par le niveau élevé de contamination, et la longueur de la racine a été influencée positivement. En raison de sa capacité à germer et à croître dans un sol contaminé par du diesel (avec un pourcentage de germination supérieur à 60% à 7,5g de diesel pour 100g de sol et une longueur de racine stimulée plutôt qu'inhibée dans les sols contaminés), *X. strumarium* pourrait potentiellement être utilisé pour la phytoremédiation de sites contaminés.

4.2. Deuxième essai de phytotoxicité (étude comparative)

D'après les résultats obtenus lors des tests de phytotoxicité (germination et croissance) de cette étude comparative, il est évident que le type de substrat est un facteur qui peut influencer le taux de germination et la croissance des diverses espèces dans un milieu contaminé. Le TU et la CH sont les deux substrats où nous avons observé les plus fortes valeurs de germination et de croissance dans les échantillons contaminés par le carburant diesel, par contre, le GG est le type de substrat avec les plus fortes inhibitions. Ainsi, le type de sol est un facteur important qui peut influencer l'ampleur des effets des produits pétroliers sur les plantes. Cependant, certaines espèces de plantes possèdent de meilleures capacités d'adaptation aux divers types de sols, tel que le *X. strumarium*.

Le type d'espèce est aussi un facteur important. En effet, les taux de germination et la croissance varient en fonction des espèces. L'inhibition ou la stimulation de la germination et de la croissance varient beaucoup d'une espèce à une autre. *Daucus carota* et *Avena sativa* sont connues comme ayant une capacité de tolérance aux hydrocarbures pétroliers, et *Daucus carota* est aussi connue comme ayant une capacité de phytoremédiation des hydrocarbures pétroliers (Frick *et al.,* 1999). Molina-Barahona *et al.,* (2005) ont rapporté que le diesel engendre des effets toxiques sur le poids sec, la longueur racinaire et la longueur de la jeune tige de l'*Avena sativa*, la réduction de la germination par contre est très faible. La famille des Asteraceae à laquelle *Xanthium strumarium* appartient a déjà été proposé pour la phytoremédiation de plusieurs métaux et a été identifiée comme ayant une haute capacité d'accumulation des métaux (Khalid *et al.,* 2018 ; Singh *et al.,* 2016).

Pour la longueur et la biomasse racinaire, nous avons observé que *X. strumarium* et *C. major* sont les plus tolérants à la contamination. *C. major* se distingue surtout au niveau de le chiraz et à 2,5% de contamination. Pour la longueur de la tige, c'est *X. strumarium* et *A. Sativa* qui se distinguent. Pour la biomasse aérienne, *X. strumarium* et *D. carota* ont présenté les inhibitions les plus faibles. Pour la germination, *X. strumarium* présente les meilleurs taux de germination. A 2,5% de contamination, *D. carota* et *A. sativa* sont les plus affectés par la contamination. Par contre, à 5% de contamination, *C. major* est la plus affectée.

Le *X. strumarium* a donc montré une bonne germination, même dans les milieux contaminés, des stimulations de la longueur et de la biomasse racinaire ont été observées et l'inhibition de la longueur et de la biomasse aérienne est beaucoup moins importante comparée aux autres espèces. D'après nos résultats, il apparaît très clairement, que *X. strumarium* est l'espèce

présentant la meilleure tolérance aux changements de substrats et à la contamination, surtout dans le niveau le plus élevé de contamination par le diesel (à 5%). La capacité du *X. strumarium* à se développer sur divers types de substrats et de conditions a été rapporté par Weaver et Lechowicz (1983) et Saric-Krsmanovic *et al.*, (2012). Ceci confirme donc les résultats obtenus par le premier test de phytotoxicité sur le *X. strumarium* qui présente de très bonnes capacités de tolérance aux milieux contaminés par le carburant diesel, avec certaines stimulations de la croissance racinaire dans les substrats pollués par le diesel. Selon Nikolić et Stevović (2015), les espèces de la famille des astéracées conviennent très bien à la phytoremédiation d'un large éventail de polluants dans les zones urbaines et ces plantes peuvent éliminer les polluants par divers mécanismes : l'absorption, la concentration, la transformation et la stabilisation des polluants, ainsi que la dégradation par la rhizosphère, où les plantes favorisent la croissance de bactéries qui décomposent à leur tour les polluants.

Les graines du *Xanthium strumarium* sont contenues à l'intérieur d'une capsule (Fruit), de ce fait il est possible que ce dernier constitue une protection contre le contaminant et empêche la formation d'un film sur les graines, réduisant ainsi les risques de diminution des échanges d'oxygène et d'eau et réduisant aussi les dégâts physiques qui peuvent être provoqués lors du contact entre le contaminant et les graines. Selon Amakiri et Onofeghara (1984), l'intégrité et la dureté de l'enveloppe de la graine affectent le taux de pénétration des produits pétroliers, de ce fait il existe des variations entre les espèces.

Les tests de phytotoxicité que nous avons effectués sont limités dans le temps (3 semaines). De ce fait, il serait intéressant d'effectuer des tests avec une durée de temps plus longue. Et il serait très intéressant d'utiliser l'espèce végétale *Xanthium strumarium* pour un test de phytoremédiation d'un site contaminé par des produits pétroliers. Il serait aussi intéressant de réaliser des expériences de phytotoxicité du diesel sur le *X. strumarium*, mais cette fois-ci, en utilisant directement des graines extraites des capsules.

CONCLUSION GENERALE

Les différents travaux effectués dans le cadre de cette thèse contribuent à une meilleure compréhension des effets des produits pétroliers sur les espèces végétales et animales. Les objectifs de l'étude sont d'étudier les communautés végétales et animales vivants dans divers milieux contaminés et non contaminés, à travers des inventaires et des essais de phytotoxicité.

Nous avons aussi mené une étude spatiale du réseau de distribution de produits pétroliers dans la région de Tizi-Ouzou, en utilisant un système d'information géographique. Cette étude nous a permis de mettre en évidence les zones les mieux équipées en stations-services ; les zones centrales, le long de la RN12, et les zones les moins équipées ; les zones périphériques des côtés Est et Sud. Vingt et une communes sont dépourvues de stations-services. Au-dessus de 20 000 habitants, il n'y a qu'une seule commune dépourvue de station-service (Ath Yahia Moussa). Cette étude a, aussi, permis une mise à jour de la distribution des stations-services dans la région de Tizi-Ouzou (l'ancienne carte de distribution n'étant plus à jour), et surtout de répertorier ces stations-services qui sont de potentielles sources de pollution par les hydrocarbures, voir aussi d'incendies et d'explosions.

Les analyses physico-chimiques des sols à proximité des stations-services, nous ont permis de constater une contamination de ces sites par des produits pétroliers et de constater des effets sur plusieurs paramètres (carbone, azote, humidité). Le rapport C/N, qui peut beaucoup influencer le développement des végétaux, a été altéré. Les analyses des TPH sur le troisième site ont permis de révéler une forte contamination du site, qui s'atténue en s'éloignant du point de rejet. Les tests qualitatifs nous ont permis de constater des zones polluées dans les sites 1 et 2. Les taux de carbone dans ces deux sites suggèrent une nette différenciation entre la zone 1 et les autres zones.

L'étude des communautés animales à proximité d'une station-service, nous a permis de constater une différenciation entre les communautés d'invertébrés vivants dans les zones les plus contaminées comparativement aux zones les moins et les non contaminées. Nous avons, ainsi, constaté des effets négatifs de la contamination sur beaucoup de groupes d'invertébrés. Par exemple, les Entomobryomorpha, les Hymenoptera, les Parasitiformes et les Coleoptera ont enregistré leurs valeurs les plus faibles dans la zone la plus contaminée (zone 1). Cependant ces mêmes ordres ont été parfois favorisés par les zones moyennes (zones 2 et 3). Par contre, les Isopoda et les Stylommatophora ont enregistré leurs valeurs les plus fortes dans les zones contaminées. D'un autre côté, les Aranea et les Chilopoda se retrouvent plus dans les zones non et peu contaminées. Nous supposons que les fortes contaminations influencent négativement le

nombre d'individus de certains ordres, alors que les faibles contaminations peuvent favoriser certains ordres. Le nombre d'ordres n'a montré aucune tendance particulière et ne semble pas avoir été affecté par la contamination, il est possible que pour pouvoir observer les effets sur la richesse, il faille aller vers les rangs inférieurs (famille, espèce). Nous supposons que les effets négatifs se font d'une manière, à la fois directe, par effets toxiques et par la fuite des organismes vers les milieux non contaminés, et aussi indirecte, à travers les modifications apportées par la contamination sur les propriétés du sol et sur la structure de la végétation.

L'inventaire de la végétation sur 3 sites à proximité de 2 stations-services, nous a permis de constater une différenciation entre les zones contaminées et non contaminées. La richesse en espèce et l'abondance ont été très affectées dans la zone 1. Certaines espèces végétales ont été fortement retrouvées dans les zones contaminées. Nous avons remarqué que les espèces *Avena sp*, *Conium maculatum* et *Oxalis pes-caprae* présentent une répartition très large, qui s'étend jusqu'aux zones contaminées, alors que d'autres espèces telles que *Beta vulgaris*, *Senecio vulgaris*, *Malva sylvestris*, *Sonchus oleraceus*, *Galactites tomentosa* et *Scolymus hispanicus* ont été peu ou pas retrouvées dans les zones contaminées. Une espèce se distingue des autres : *Xanthium strumarium* qui a montré une préférence pour la zone 1, plus particulièrement dans les sites 2 et 3, avec une tendance à dominer la zone 1.

Il est nécessaire d'identifier et d'étudier toutes les espèces qui sont capables de se développer dans des zones contaminées pour une éventuelle utilisation en phytoremédiation. Ainsi, suite à l'inventaire de la végétation, où nous avons remarqué que *Xanthium struamrium* est bien représentée dans les zones contaminées, nous avons effectué un premier test de phytotoxicité au diesel sur *X. struamrium*. Nous avons pu constater, que cette espèce est capable de germer et de croitre sur des sols très pollués par du carburant diesel. Nous avons même enregistré une stimulation de la longueur racinaire de l'espèce dans les sols contaminés.

Nous avons comparé le *Xanthium strumarium* avec d'autres espèces (*Avena sativa*, *Daucus carota*, et *Cerinthe major*), dans un test de phytotoxicité au diesel, et cette fois-ci en utilisant 4 différents types de substrats (Chiraz, terreau universel, Sicoflore, et Go green). Les résultats montrent que le *X. struamrium* est l'espèce la plus tolérante à la contamination, et c'est aussi l'espèce qui s'adapte le mieux au changement de substrats. Les graines du *X. strumarium* sont contenues dans une capsule (Fruit), de ce fait il est possible que celui-ci aide à protéger les graines de certains effets négatifs de la contamination (tel que les dommages provoqués par le contact direct et la formation d'un film autour de la graine). Pour les 3 autres espèces, *C. major*

a présenté la meilleure longueur et biomasse racinaire, *A. sativa* a présenté la meilleure longueur de tige et *D. carota* la meilleure biomasse aérienne. Pour la germination, à un niveau de contamination de 2,5%, *D. carota* et *A. sativa* sont les plus affectés par la contamination et à un niveau de contamination de 5%, *C. major* est l'espèce la plus affectée. Par ailleurs, nous avons aussi remarqué que le terreau universel et le chiraz sont les substrats les plus efficaces, surtout à 5% de contamination.

Suite aux résultats obtenus, nous pouvons émettre quelques perspectives, dans le but d'améliorer notre compréhension du comportement des espèces végétales et animales dans des zones contaminées par des produits pétroliers, et dans le but d'améliorer les technologies de dépollution naturelles des sites contaminés notamment :

- Utilisation de *X. strumarium* pour des tests de phytoremédiation, pour ainsi déterminer son éventuelle capacité à dépolluer des sites contaminés par des produits pétroliers ;
- Effectuer des tests de phytotoxicité de produits pétroliers sur le *X. strumarium*, en utilisant des graines extraites des capsules, dans le but de voir si ce dernier joue un rôle dans la tolérance de cette espèce à la contamination ;
- Effectuer des tests de phytotoxicité sur le *X. strumarium*, avec des polluants autres que le carburant diesel (métaux lourds, essence, HAP…) ;
- Étude approfondie des effets des stations-services sur les espèces d'invertébrés et les comportements de ces derniers dans ce genre d'environnement, notamment les Entomobryomorpha, les Hymeoptera, les Isopoda, et les Stylommatophora ;
- Étude spatiale du réseau de distribution des produits pétroliers à échelle nationale et conception d'une carte de distribution des stations-services à l'échelle nationale. Et dans un second temps, concevoir des cartes répertoriant les zones contaminées, de peu à très contaminées, où il serait nécessaire de faire une décontamination.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

AAT Bioquest. (2018). *Quest Graph™ ED50 Calculator*. https://www.aatbio.com/tools/ed50-calculator

Abha, S., & Singh, C. S. (2012). Hydrocarbon Pollution: Effects on Living Organisms, Remediation of Contaminated Environments, and Effects of Heavy Metals Co-Contamination on Bioremediation. *Introduction to Enhanced Oil Recovery (EOR) Processes and Bioremediation of Oil-Contaminated Sites*. https://doi.org/10.5772/48014

Adam, G., & Duncan, H. J. (1999). Effect of diesel fuel on growth of selected plant species. *Environmental Geochemistry and Health*, *21*(4), 353–357. https://doi.org/10.1023/A:1006744603461

Adam, Gillian, & Duncan, H. (2002). Influence of diesel fuel on seed germination. *Environmental Pollution*, *120*(2), 363–370. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00119-7

Adam, Gillian, & Duncan, H. (2003). The Effect of Diesel Fuel on Common Vetch (Vicia Sativa L.) Plants. *Environmental Geochemistry and Health*, *25*(1), 123–130. https://doi.org/10.1023/A:1021228327540

Administration de l'environnement du Luxembourg. (2014). *STATION DE SERVICE (Exp-sta-serv)*. Administration de l'environnement du Luxembourg. https://docplayer.fr/11485678-Station-de-service-exp-sta-serv.html

Agence Européenne pour l'environnement. (2006). *Problèmes prioritaires pour l'environnement méditerranéen* (No. 4; p. 86). Agence Européenne pour l'environnement. https://www.eea.europa.eu/fr/publications/eea_report_2006_4

Ahmad, M., Gul-Zaffar, Dar, Z. A., & Habib, M. (2014). A review on Oat (Avena sativa L.) as a dual-purpose crop. *Scientific Research and Essays*, *9*(4), 52–59. https://doi.org/10.5897/SRE2014.5820

Akpan, G. U., & Udoh, B. T. (2013). Evaluation of Some Properties of Soils Affected by Diesel Oil Pollution in Uyo, Niger Delta Area, Nigeria. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, *3*(8), 33-42–42.

Al-Mudaris, M. A. (1998). Notes on various parameters recording the speed of seed germination. *Journal of Agriculture in the Tropics and Subtropics*, *99*(2), 147–154.

Amakiri, J. O., & Onofeghara, F. A. (1984). Effects of crude oil pollution on the germination of Zea mays and Capsicum frutescens. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*, *35*(2), 159–167. https://doi.org/10.1016/0143-1471(84)90136-3

ANDI. (2013). *Monographie de la wilaya de Tizi-Ouzou*. Agence Nationale de Développement de l'Investissement (ANDI).

ANIREF. (2013). *Rubrique Monographie Wilaya: Wilaya de Tizi-Ouzou*. Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière (ANIREF).

Baek, K.-H., Kim, H.-S., Oh, H.-M., Yoon, B.-D., Kim, J., & Lee, I.-S. (2004). Effects of crude oil, oil components, and bioremediation on plant growth. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, *39*(9), 2465–2472.

Baker, J. M. (1970). The effects of oils on plants. *Environmental Pollution (1970)*, *1*(1), 27–44. https://doi.org/10.1016/0013-9327(70)90004-2

Barriuso, E., Calvet, R., Schiavon, M., & Soulas, G. (1996). Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformations et dissipation. *Étude et Gestion Des Sols*, *3*(4), 279–296.

Baruah, P., Saikia, R. R., Baruah, P. P., & Deka, S. (2014). Effect of crude oil contamination on the chlorophyll content and morpho-anatomy of Cyperus brevifolius (Rottb.) Hassk. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(21), 12530–12538. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3195-y

Benmecheta, A., & Belkhir, L. (2016). Oil Pollution in the Waters of Algeria. In A. Carpenter & A. G. Kostianoy (Eds.), *Oil Pollution in the Mediterranean Sea: Part II: National Case Studies* (pp. 247–262). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/698_2016_57

Bergue, J.-M., & Mérienne, D. (1986). La pollution des sols par les hydrocarbures. *Bulletin de Liaison Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, *146*, 57–66.

Bernier, C. (2006). *Cerinthe major L.* https://www.tela-botanica.org/bdtfx-nn-16213-illustrations

Berthelin, J., & Toutain, F. (1979). *Biologie des sols. In: Pédologie. II. Constituants et propriétés du sol. Souchier et Bonneau Eds*. Masson.

Blakely, J. K., Neher, D. A., & Spongberg, A. L. (2002). Soil invertebrate and microbial communities, and decomposition as indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination. *Applied Soil Ecology*, *21*(1), 71–88. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00023-9

Bona, C., Rezende, I. M. de, Santos, G. de O., & Souza, L. A. de. (2011). Effect of soil contaminated by diesel oil on the germination of seeds and the growth of Schinus terebinthifolius Raddi (Anacardiaceae) seedlings. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *54*(6), 1379–1387. https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000600025

Borowiec, M., Hoffmann, K., Huculak, M., Rogowski, S., & Hoffmann, J. (2008). *Effect of petrol stations on the contamination of the soil environment*. *2-Ch*(16), 62–69.

Braun-Blanquet, J., Conard, H. S., & Fuller, G. D. (1932). *Plant sociology the study of plant communities* (1st ed.). McGraw-Hill book company, inc.,. https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/7161

Calvet, R. (2013). *Le sol* (2e édition). France Agricole.

Castellanos, B., Zabala-Cruz, J., Martinez, S., Dendooven, L., Margarita Contreras-Ramos, S., Noa-Carrazana, J. C., Fragoso, C., & Ortiz-Ceballos, A. I. (2013). Earthworm Populations in an Aged Hydrocarbon Contaminated Soil. *Research Journal of Environmental Sciences*, *7*, 27–37. https://doi.org/10.3923/rjes.2013.27.37

Castro, S., Loureiro, J., Santos, C., Ater, M., Ayensa, G., & Navarro, L. (2007). Distribution of flower morphs, ploidy level and sexual reproduction of the invasive weed Oxalis pes-caprae in the western area of the Mediterranean region. *Annals of Botany*, *99*(3), 507–517. https://doi.org/10.1093/aob/mcl273

Centre international de Recherche sur le Cancer. (2012). *Les gaz d'échappement des moteurs diesel cancérogènes*. Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC). https://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_F.pdf

Chenchouni, H., Menasria, T., Neffar, S., Chafaa, S., Bradai, L., Chaibi, R., Mekahlia, M. N., Bendjoudi, D., & Bachir, A. S. (2015). Spatiotemporal diversity, structure and trophic guilds of insect assemblages in a semi-arid Sabkha ecosystem. *PeerJ*, *3*, e860. https://doi.org/10.7717/peerj.860

Colin, F., Curien, H., Jauzein, M., Darmendrail, D., Alcayde, G., Beraud, J.-F., Costes, J. M., & Gatellier, C. (2000). *Pollutions localisées des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés* (p. 417). Technique & documentation.

Cruz, J. M., Tamada, I. S., Lopes, P. R. M., Montagnolli, R. N., & Bidoia, E. D. (2014). Biodegradation and phytotoxicity of biodiesel, diesel, and petroleum in soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, *225*(5), 1962. https://doi.org/10.1007/s11270-014-1962-5

Dangerfield, J. M. (1997). Abundance and diversity of soil macrofauna in northern Botswana. *Journal of Tropical Ecology*, *13*(4), 527–538. https://doi.org/10.1017/S0266467400010695

Dazy, M., Béraud, E., Cotelle, S., Grévilliot, F., Férard, J.-F., & Masfaraud, J.-F. (2009). Changes in plant communities along soil pollution gradients: Responses of leaf antioxidant enzyme activities and phytochelatin contents. *Chemosphere*, *77*(3), 376–383. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.07.021

Delaune, M., Reiffsteck, M., & Feller, C. (1991). L'analyse granulométrique de sols et sédiments à l'aide du microgranulomètre « Sedigraph 5000 ET » Comparaison avec la méthode « pipette Robinson ». *Cah. Orstom, Sér, Pédol*, *15*(2), 183–189.

Department of Environment and Climate Change. (2008). *Environmental Action for service stations*. Department of Environment and Climate Change (NSW). epa.nsw.gov.au/resources/clm/2008552ServStations.pdf

Dice, L. R. (1945). Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species. *Ecology*, *26*(3), 297–302. JSTOR. https://doi.org/10.2307/1932409

Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaire. (2019). *Annuaire statistique année 218* (p. 256). https://www.ummto.dz/wp-content/uploads/2019/06/Annuaire-statistique-de-la-Wilaya-de-Tizi-Ouzou-.Ann%C3%A9e-2018.pdf

Direction générale des douanes. (2018). *STATISTIQUES DU COMMERCE EXTERIEUR DE L'ALGERIE* (p. 17). Direction générale des douanes. http://www.douane.gov.dz/Quelles%20statistiques%20a%20votre%20service.html

Djellouli, M., Esposito, V., Taleb, S., benghalem, A., & tundo, P. (2009). *ANALYSE PRÉLIMINAIRE DE LA POLLUTION DE QUELQUES SOLS PAR LES HAPS (HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES) POUR UNE AGRICULTURE DURABLE*. 298-401.

https://www.agrimaroc.net/2009/07/26/contraintes-et-perspectives-de-developpement-pour-lagriculture-mediterraneenne/

DUC. (2011). *Révision du PDAU de la commune de Fréha* (p. 72). Direction de l'urbanisme et de la construction (DUC).

DUC. (2012). *Révision du PDAU de la commune d'Idjeur* (p. 62). Direction de l'urbanisme et de la construction (DUC).

Dudai, N., Tsion, I., Shamir, S. Z., Nitzan, N., Chaimovitsh, D., Shachter, A., & Haim, A. (2018). Agronomic and economic evaluation of Vetiver grass (Vetiveria zizanioides L.) as means for phytoremediation of diesel polluted soils in Israel. *Journal of Environmental Management*, *211*, 247–255. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.013

Duka, A., Shkurtaj, B., & Nuro, A. (2015). Determination of MTBE, TBA, BTEX and PAH in sediment and water samples of Karavasta lagoon. *Journal of International Environmental Application & Science*, *10*(2).

Eom, I. C., Rast, C., Veber, A. M., & Vasseur, P. (2007). Ecotoxicity of a polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *67*(2), 190–205. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.12.020

Eren, A. (2019). The effects of nickel applications on the growth of cocklebur (Xanthium Strumarium L.) Plant. *Applied Ecology and Environmental Research*, *17*, 2005–2013. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_20052013

Erstfeld, K. M., & Snow-Ashbrook, J. (1999). Effects of chronic low-level PAH contamination of soil invertebrate communities. *Chemosphere*, *39*(12), 2117–2139. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00421-4

Fadel, D., Boughambouz, I., Laïfa, A., & Djamaï, R. (2007). BIOINDICATION THE AIR POLLUTION BY TOTAL HYDROCARBONS BY USING A LICHENIC SPECIE IN THE AREA OF SKIKDA -ALGERIA. *Physical and Chemical News*, *34*, 126–131.

Faleet, O. J. E. (2017). Spatial analysis of the petrol stations in Khan-Younis city using geographic information system (GIS) techniques. *Journal of Geography and Regional Planning*, *10*(6), 133–147. https://doi.org/10.5897/JGRP2017.0637

Faulkner, B. C., & Lochmiller, R. L. (2000). Increased abundance of terrestrial isopod populations in terrestrial ecosystems contaminated with petrochemical wastes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *39*(1), 86–90. https://doi.org/10.1007/s002440010083

Foth, H. D. (1990). *Fundamentals of soil sciences* (8th ed.). John Wiley & Sons.

Frick, C. M., Farrell, R., & Germida, J. J. (1999). *Assessment of Phytoremediation as an In-Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites*. Petroleum Technology Alliance of Canada (PTAC). https://www.researchgate.net/publication/228592129_Assessment_of_phytoremediation_as_an_in-situ_technique_for_cleaning_oil-contaminated_sitesvVaw2A-srjsd-7nWUqTvrdptoF

García-Segura, D., Castillo-Murrieta, I. M., Martínez-Rabelo, F., Gomez-Anaya, A., Rodríguez-Campos, J., Hernández-Castellanos, B., Contreras-Ramos, S. M., & Barois, I. (2018). Macrofauna and mesofauna from soil contaminated by oil extraction. *Geoderma*, *332*, 180–189. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.013

Gass, F., Gillet, S., & Ponge, J.-F. (2006). The use of directional traps for the assessment of short-term phenanthrene effects upon soil springtail communities. *Environmental Pollution*, *140*(2), 364–370. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.06.027

GAWRONSKI, S. W., & GAWRONSKA, H. (2007). PLANT TAXONOMY FOR PHYTOREMEDIATION. In N. Marmiroli, B. Samotokin, & M. Marmiroli (Eds.), *Advanced Science and Technology for Biological Decontamination of Sites Affected by Chemical and Radiological Nuclear Agents* (pp. 79–88). Springer Netherlands.

Gill, L. S., Nyawuame, H. G. K., & Ehikhametalor, A. O. (1992). Effect of Crude Oil on the Growth and Anatomical Features of Chromolaena odorata (L.). *Chromolaena Odorata Newsletter*, *6*, 1–6.

Gillet, S., & Ponge, J. F. (2002). Humus forms and metal pollution in soil. *European Journal of Soil Science*, *53*(4), 529–540. https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00479.x

Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2012). *Le sol vivant: Bases de pédologie, biologie des sols* (3rd ed.). Presses polytechniques et universitaires romandes.

Gospodarek, J., Petryszak, P., Kołoczek, H., & Rusin, M. (2019). The effect of soil pollution with petroleum-derived substances on Porcellio scaber Latr. (Crustacea, Isopoda). *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(1). https://doi.org/10.1007/s10661-018-7181-6

Grzes´, I. M. (2009). Ant species richness and evenness increase along a metal pollution gradient in the Bolesław zinc smelter area. *Pedobiologia*, *53*(1), 65–73. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2009.03.002

Gulezian, P. Z., Ison, J. L., & Granberg, K. J. (2012). Establishment of an Invasive Plant Species (Conium maculatum) in Contaminated Roadside Soil in Cook County, Illinois. *The American Midland Naturalist*, *168*(2), 375–395. https://doi.org/10.1674/0003-0031-168.2.375

Hawrot-Paw, M., Wijatkowski, A., & Mikiciuk, M. (2015). Influence of diesel and biodiesel fuel-contaminated soil on microorganisms, growth and development of plants. *Plant, Soil and Environment*, *61*(5), 189–194. https://doi.org/10.17221/974/2014-PSE

Henry, J. A. (1998). Composition and toxicity of petroleum products and their additives. *Human & Experimental Toxicology*, *17*(2), 111–123. https://doi.org/10.1177/096032719801700206

Hiegel, C. (1999). La station-service: Étude spatiale du réseau de distribution de carburant à Strasbourg. *Revue Géographique de l'Est*, *39*(vol. 39 / 2-3). http://journals.openedition.org/rge/4444

Hierro, J. L., Villarreal, D., Eren, O., Graham, J. M., & Callaway, R. M. (2006). Disturbance facilitates invasion: The effects are stronger abroad than at home. *The American Naturalist*, *168*(2), 144–156. https://doi.org/10.1086/505767

International Tanker Owners Pollution Federation Limited. (2019). *Country profile for Algeria*. International Tanker Owners Pollution Federation Limited. https://www.itopf.org/knowledge-resources/countries-territories-regions/countries/algeria/

ISO. (1994). *ISO 11265:1994: Qualité du sol—Détermination de la conductivité électrique spécifique*. ISO. https://www.iso.org/fr/standard/19243.html

Jaworska, M., & Gospodarek, J. (2007). Effect of oil derivatives in soil on selected invertebrates. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*, *Vol. 14, nr 11*, 1181–1187.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2006b). *Décret exécutif n° 06-198 du 4 Joumada El Oula 1427 correspondant au 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement*.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2007a). *Décret exécutif n° 07-144 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement*.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2006a). *Décret exécutif n° 2006-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels*.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2007b). *Décret exécutif n° 2007-145 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement*.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2009). *Décret exécutif n° 09-209 du 17 Joumada Ethania 1430 correspondant au 11 juin 2009 fixant les modalités d'octroi de l'autorisation de déversement des eaux usées autres que domestiques dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration*.

Kamboj, A., & Saluja, A. K. (2010). Phytopharmacological review of Xanthium strumarium L. (Cocklebur). *International Journal of Green Pharmacy (IJGP)*, *4*(3), Article 3. https://doi.org/10.22377/ijgp.v4i3.133

Kaul, V. (1971). Physiological-ecology of Xanthium strumarium Linn. *New Phytologist*, *70*(4), 799–812. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1971.tb02580.x

Kerbachi, R., Boughedaoui, M., Bounoua, L., & Keddam, M. (2006). Ambient air pollution by aromatic hydrocarbons in Algiers. *Atmospheric Environment*, *40*(21), 3995–4003. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.02.033

Khalid, N., Noman, A., Aqeel, M., Masood, A., & Tufail, A. (2018). Phytoremediation potential of Xanthium strumarium for heavy metals contaminated soils at roadsides. *International Journal of Environmental Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/s13762-018-1825-5

Khare, C. P. (2007). *Indian Medicinal Plants: An Illustrated Dictionary*. Springer-Verlag. https://www.springer.com/gp/book/9780387706375

Kirk, J. L., Klirnomos, J. N., Lee, H., & Trevors, J. T. (2002). Phytotoxicity assay to assess plant species for phytoremediation of petroleum-contaminated soil. *Bioremediation Journal*, *6*(1), 57–63. https://doi.org/10.1080/10889860290777477

Kömives, T., & Gullner, G. (2000). Phytoremediation. In *Plant–Environment Interactions* (2nd ed., pp. 437–452). Marcel Dekker, Inc.

Labar, S., Hani, A., & Djabri, L. (2012). Biochemical Approach to Assess Groundwater Pollution by Petroleum Hydrocarbons (Case Skikda Algeria). *Journal of Water Resource and Protection*, *4*(7), 493–496. https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.47057

Labud, V., Garcia, C., & Hernandez, T. (2007). Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and a clay soil. *Chemosphere*, *66*(10), 1863–1871. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.021

Lemière, B., Seguin, J. J., Le Guerne, C., Guyonnet, D., Baranger, P., & Saada, A. (2008). *Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes*. http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-comportement-polluants

Löve, D., & Dansereau, P. (1959). Biosystematic studies on Xanthium: Taxonomic appraisal and ecological status. *Canadian Journal of Botany*, *37*(2), 173–208. https://doi.org/10.1139/b59-016

Lu, Q., He, Z. L., Graetz, D. A., Stoffella, P. J., & Yang, X. (2010). Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (Pistia stratiotes L.). *Environmental Science and Pollution Research*, *17*(1), 84–96. https://doi.org/10.1007/s11356-008-0094-0

Luhach, J., & Chaudhry, S. (2012). Effect of diesel fuel contamination on seed germination and growth of four agricultural crops. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, *2*(4), 311–317.

Mai, Y. (2006). Avena sativa Linnaeus, Sp. Pl. 1: 79. 1753. *Flora of China*, *22*, 323–324.

Maliszewska-Kordybach, B., & Smreczak, B. (2000). Ecotoxicological activity of soils polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)—Effect on plants. *Environmental Technology*, *21*(10), 1099–1110. https://doi.org/10.1080/09593330.2000.9618996

Mandal, A. K., Sarma, P. M., Jeyaseelan, C. P., Channashettar, V. A., Singh, B., Agnihotri, A., Lal, B., & Datta, J. (2014). Large Scale Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Waste at Various Installations of ONGC. India: Case Studies. *Environmental Research, Engineering and Management*, *68*(2), 41-52–52. https://doi.org/10.5755/j01.erem.68.2.5632

Meybeck, M., Blet, E., Barret, P., & Della Massa, J.-P. (2006). Étude de l'exposition en hydrocarbures (type BTEX) lors du remplissage du réservoir d'un véhicule. *Pollution Atmosphérique*, *191*, 337–345. https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.1540

Ministère de l'Énergie. (2017). *Produits Pétroliers*. https://www.energy.gov.dz/?rubrique=produits-petroliers

Molina-Barahona, L., Vega-Loyo, L., Guerrero, M., Ramírez, S., Romero, I., Vega-Jarquín, C., & Albores, A. (2005). Ecotoxicological evaluation of diesel-contaminated soil before and after a bioremediation process. *Environmental Toxicology*, *20*(1), 100–109. https://doi.org/10.1002/tox.20083

Moschini, L. E., Santos, J. E. dos, & Pires, J. S. R. (2005). Environmental diagnosis of risk areas related to gas stations. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *48*(4), 657–666. https://doi.org/10.1590/S1516-89132005000500019

Nafissa, B., Bouzerna, N., & Chettibi, H. (2005). Assessment of the Petrochemical Industry Pollution on the Skikda Bay, Algeria. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *2*(3), 463–468. https://doi.org/10.3390/ijerph2005030011

Naftal. (2019). *Naftal » A propos de Naftal*. https://www.naftal.dz/fr/index.php/a-propos-de-naftal

Nakova, R., Baeva, G., & Nikolov, P. (2004). Competition between maize and Xanthium strumarium L. *Pesticidi i Fitomedicina*, *19*(4), 257–263.

Ndimele, P. E. (2010). A Review on the Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbon. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *13*, 715–2722. https://doi.org/10.3923/pjbs.2010.715.722

Nemer, W. (2015). *Étude pédologique et floristique de différents solsselonun gradient de pollution*. Université Mouloud Mammeri.

Nikolić, M., & Stevović, S. (2015). Family Asteraceae as a sustainable planning tool in phytoremediation and its relevance in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, *14*(4), 782–789. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.002

Nocentini, D., Pacini, E., Guarnieri, M., & Nepi, M. (2012). Flower morphology, nectar traits and pollinators of Cerinthe major (Boraginaceae-Lithospermeae). *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, *207*(3), 186–196. https://doi.org/10.1016/j.flora.2012.01.004

Nouri, J., Khorasani, N., Lorestani, B., Karami, M., Hassani, A. H., & Yousefi, N. (2009). Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Environmental Earth Sciences*, *59*(2), 315–323. https://doi.org/10.1007/s12665-009-0028-2

Oehlmann, J., & Schulte-Oehlmann, U. (2003). Chapter 17 Molluscs as bioindicators. *Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*, *6*, 577–635. https://doi.org/10.1016/S0927-5215(03)80147-9

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, *8*(2), 250–253. https://doi.org/10.5897/AJB2009.000-9044

Onwurah, I. N. E., Ogugua, V. N., Onyike, N. B., Ochonogor, A. E., & Otitoju, O. F. (2007). Crude Oil Spills in the Environment, Effects and Some Innovative Clean-up Biotechnologies. *International Journal of Environmental Research*, *1*(4), 307–320. https://doi.org/10.22059/ijer.2010.142

Pan, G., Zhang, H., Liu, P., Xiao, Z., Li, X., & Liu, W. (2019). Effects of manganese stress on phenology and biomass allocation in Xanthium strumarium from metalliferous and non-metalliferous sites. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *172*, 308–316. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.075

Pandey, V. C. (2012). Invasive species based efficient green technology for phytoremediation of fly ash deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, *123*, 13–18. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.05.008

Parvizi Mosaed, H., Sobhanardakani, S., Merrikhpour, H., Farmany, A., Cheraghi, M., & Ashorlo, S. (2015). The Effect of Urban Fuel Stations on Soil Contamination with Petroleum Hydrocarbons. *Iranian Journal of Toxicology*, *9*(30), 1378–1384.

Patej, S. (2002). *Etude de scenarios dangereux En stations-service* (INERIS DRA-2002-40862; p. 38). INERIS. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/52.pdf

Pétard, J. (1993). *Les méthodes d'analyse: Tome 1 Analyses de sols* (ORSTOM). ORSTOM.

Pichtel, J. (2007). *Fundamentals of Site Remediation: For Metal- and Hydrocarbon-Contaminated Soils* (Government Institutes). John Pichtel.

Pielou, E. C. (1966). The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, *13*, 131–144. https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0

Povey, S. (2007). *English: Sea Carrot at South Stack, Anglesey. (Daucus carota ssp gummifer) the subspecies of our native Wild Carrot growing beside the path to the Lighthouse.* From geograph.org.uk. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sea_Carrot_at_South_Stack,_Anglesey._-_geograph.org.uk_-_1279145.jpg

Rhbal, H., Souabi, S., Safi, M., Arad, M., & Anouzla, A. (2010). Hydrocarbons diagnostic of polluted soils. *Scientific Study & Research Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, *11*(4), 449–458.

Ricour, J., & Lallemand-Barrès, A. (1994). *Sites pollués et déchets*. BRGM.

Rouiller, J., Souchier, B., Bruckert, B., Feller, C., Toutain, F., & Vedy, J. C. (1994). MÉTHODES D'ANALYSES DES SOLS. In *PÉDOLOGIE: 2 CONSTITUANTS ET PROPRIÉTÉS DU SOL* (2nd ed., pp. 619–654). MASSON.

Rusin, M., & Gospodarek, J. (2016). The Occurrence of Springtails (Collembola) and Spiders (Araneae) as anEffectiveness Indicator of Bioremediation of Soil Contaminated by Petroleum-Derived Substances. *International Journal of Environmental Research*, *10*(3), 449–458. https://doi.org/10.22059/ijer.2016.58764

Saada, A., Nowak, C., Chartier, R., & Coquereau, N. (2006). *Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures* (BRGM/RP-54183-FR; p. 99). BRGM.

Sapre, S., Gontia-Mishra, I., & Tiwari, S. (2018). Klebsiella sp. Confers enhanced tolerance to salinity and plant growth promotion in oat seedlings (Avena sativa). *Microbiological Research*, *206*, 25–32. https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.09.009

Saric-Krsmanovic, M., Bozic, D., Pavlovic, D., Elezović, I., & Vrbnicanin, S. (2012). Temperature effects on common cocklebur (Xanthium strumarium L.) seed germination. *Romanian Agricultural Research*, 389–393.

Selvi, F., Cecchi, L., & Coppi, A. (2009). Phylogeny, Karyotype Evolution and Taxonomy of Cerinthe L. (Boraginaceae). *Taxon*, *58*(4), 1307–1325. JSTOR.

Sendelbach, H. (2005). *Avena sativa L* [JPG]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Avena_sativa_L.jpg

Shannon, C. E., & Weaver, W. (1964). *The Mathematical theory of communication*. The university of Illinois press.

Sharifi, M., Sadeghi, Y., & Akbarpour, M. (2007). Germination and growth of six plant species on contaminated soil with spent oil. *International Journal of Environmental Science & Technology*, *4*(4), 463–470. https://doi.org/10.1007/BF03325982

Sharma, G. P., Muhl, S. A., Esler, K. J., & Milton, S. J. (2010). Competitive interactions between the alien invasive annual grass Avena fatua and indigenous herbaceous plants in South African Renosterveld: The role of nitrogen enrichment. *Biological Invasions*, *12*(9), 3371–3378. https://doi.org/10.1007/s10530-010-9730-y

Shirdam, R., Zand, A., Bidhendi, G., & 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. https://doi.org/10.7202/000379ar

Singh, A., Prasad, S. M., Singh, S., & Singh, M. (2016). Phytoremediation potential of weed plants' oxidative biomarker and antioxidant responses. *Chemistry and Ecology*, *32*(7), 684–706. https://doi.org/10.1080/02757540.2016.1182994

Solano-Serena, F., Marchal, R., & Vandecasteele, J. P. (2001). Biodégradabilité de l'essence dans l'environnement: De l'évaluation globale au cas des hydrocarbures récalcitrants. *Oil & Gas Science and Technology*, *56*(5), 479–498. https://doi.org/10.2516/ogst:2001039

Song, H., Wang, Y.-S., Sun, C.-C., Wu, M.-L., Peng, Y.-L., Deng, C., & Li, Q. P. (2011). Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons exposure on antioxidant system activities and proline content in Kandelia candel. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, *40*(3), 9. https://doi.org/10.2478/s13545-011-0024-5

Sørensen, T. (1948). A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *Biologiske Skrifter*, *5*(4), 1–34.

Stengel, p, & Gelin, S. (1998). *Sol: Interface fragile*. INRA.

Tang, J., Wang, M., Wang, F., Sun, Q., & Zhou, Q. (2011). Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences (China)*, *23*(5), 845–851. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60517-7

Trueman, R. J., & Erber, L. (2013). Invasive species may offer advanced phytoremediation of endocrinedisrupting chemicals in aquatic ecosystems. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, *25*(9), 648. https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i9.16393

U.S. Energy Information Administration. (2016). *International Energy Outlook 2016* (p. 276). U.S. Energy Information Administration. www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf

U.S. Energy Information Administration. (2019). *International—U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Https://Www.Eia.Gov. https://www.eia.gov/beta/international/

USDA. (2019). *Soil Texture Calculator*. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167

Van Straalen, N. (2004). Chapter 6 The use of soil invertebrates in ecological surveys of contaminated soils. *Developments in Soil Science*, *29*, 159–195. https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)80010-2

Vetter, J. (2004). Poison hemlock (Conium maculatum L.). *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, *42*(9), 1373–1382. https://doi.org/10.1016/j.fct.2004.04.009

Weaver, S. E., & Lechowicz, M. J. (1983). The biology of Canadian weeds. 56. Xanthium strumarium L. *Canadian Journal of Plant Science*, *63*(1), 211–225. https://doi.org/10.4141/cjps83-021

White, R. E. (2005). *Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource* (4th Edition). Wiley-Blackwell.

Wilaya d'Alger. (2012). *Guide illustré de la flore algérienne* (Vol. 1–1). Délégation générale aux relations internationales, Ville de Paris.

Wu, Q., Zhang, X., & Zhang, Q. (2017). Current situation and control measures of groundwater pollution in gas station. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *94*, 012005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/94/1/012005

Xu, Z., & Chang, L. (2017). *Identification and Control of Common Weeds: Volume 3* (1st ed., Vol. 3). Springer Singapore. https://www.springer.com/gp/book/9789811054020

Annexes

Annexe 1 : Abondance totale (N), richesse en espèces (S), diversité de Shannon-Weaver (H') et équitabilité de Pielou (J) dans les trois sites d'échantillonnage

Site	Zone	N				S				H'				J			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
1	1T1	10^{a}	3^{a}	11^{a}	7^{a}	3	1^{a}	5	4^{a}	1,49	$0,00^{a}$	1,97	$1,84^{a}$	$0,94^{a}$	$0,00^{a}$	$0,85^{a}$	$0,92^{a}$
	1T2	8^{a}	4^{a}	12^{a}	7^{a}	3	1^{a}	6	4^{a}	1,50	$0,00^{a}$	2,13	$1,84^{a}$	$0,95^{a}$	$0,00^{a}$	$0,82^{a}$	$0,92^{a}$
	2T1	24^{b}	23^{b}	72^{b}	50^{b}	6	3^{b}	10	7^{b}	2,18	$1,40^{b}$	2,52	$2,43^{b}$	$0,84^{ab}$	$0,89^{b}$	$0,76^{ab}$	$0,86^{b}$
	2T2	25^{b}	30^{b}	64^{b}	65^{b}	5	4^{b}	9	10^{b}	1,85	$1,67^{b}$	2,60	$2,69^{b}$	$0,80^{ab}$	$0,83^{b}$	$0,82^{ab}$	$0,81^{b}$
	3T1	31^{c}	31^{b}	89^{c}	77^{c}	5	6^{c}	9	13^{c}	1,57	$1,85^{b}$	2,39	$2,97^{b}$	$0,68^{bc}$	$0,71^{b}$	$0,75^{ab}$	$0,80^{b}$
	3T2	30^{c}	47^{b}	80^{c}	83^{c}	5	6^{c}	10	10^{c}	1,69	$2,05^{b}$	2,55	$2,50^{b}$	$0,73^{bc}$	$0,79^{b}$	$0,77^{ab}$	$0,75^{b}$
	4T1	35^{d}	39^{b}	81^{c}	78^{c}	7	9^{d}	8	13^{d}	1,99	$2,94^{c}$	2,08	$2,93^{b}$	$0,71^{c}$	$0,93^{b}$	$0,69^{b}$	$0,79^{b}$
	4T2	36^{d}	38^{b}	86^{c}	76^{c}	5	8^{d}	12	13^{d}	1,40	$2,45^{c}$	2,62	$3,02^{b}$	$0,60^{c}$	$0,82^{b}$	$0,73^{b}$	$0,82^{b}$
2	1T1	17^{a}	1^{a}	12^{a}	19^{a}	4	1^{a}	5^{a}	3^{a}	$1,97^{ab}$	$0,00^{a}$	2,19	$0,95^{a}$	$0,99^{a}$	$0,00^{a}$	0,94	$0,60^{a}$
	1T2	15^{a}	1^{a}	8^{a}	14^{a}	4	1^{a}	3^{a}	3^{a}	$1,83^{ab}$	$0,00^{a}$	1,06	$0,73^{a}$	$0,91^{a}$	$0,00^{a}$	0,67	$0,46^{a}$
	2T1	40^{ab}	72^{b}	38^{b}	47^{b}	5	6^{b}	7^{b}	9^{b}	$2,01^{ab}$	$1,43^{b}$	1,79	$2,56^{b}$	$0,86^{b}$	$0,55^{b}$	0,64	$0,81^{b}$
	2T2	31^{ab}	57^{b}	30^{b}	40^{b}	7	5^{b}	7^{b}	10^{b}	$2,41^{ab}$	$1,33^{b}$	2,03	$2,82^{b}$	$0,86^{b}$	$0,57^{b}$	0,72	$0,85^{b}$
	3T1	53^{b}	33^{b}	51^{c}	61^{b}	6	3^{c}	7^{b}	13^{c}	$2,09^{a}$	$1,45^{b}$	1,97	$3,09^{b}$	$0,81^{b}$	$0,92^{b}$	0,70	$0,83^{b}$
	3T2	35^{b}	66^{b}	46^{c}	52^{b}	7	4^{c}	8^{b}	12^{c}	$2,28^{a}$	$1,09^{b}$	2,33	$3,03^{b}$	$0,81^{b}$	$0,54^{b}$	0,78	$0,84^{b}$
	4T1	55^{b}	78^{b}	56^{c}	73^{c}	6	4^{c}	3^{a}	6^{d}	$1,50^{b}$	$1,23^{b}$	1,06	$1,99^{c}$	$0,58^{c}$	$0,61^{b}$	0,67	$0,77^{b}$
	4T2	55^{b}	78^{b}	57^{c}	85^{c}	6	4^{c}	4^{a}	7^{d}	$1,57^{b}$	$1,23^{b}$	1,07	$2,19^{c}$	$0,61^{c}$	$0,61^{b}$	0,54	$0,78^{b}$
3	1T1	24^{a}	10^{a}	10^{a}	9^{a}	4	4	3	3^{a}	$1,87^{ab}$	1,90	1,49	$0,99^{a}$	$0,94^{a}$	$0,95^{a}$	0,94	$0,62^{a}$
	1T2	32^{a}	9^{a}	3^{a}	13^{a}	5	3	2	3^{a}	$1,98^{ab}$	1,53	0,92	$0,99^{a}$	$0,85^{a}$	$0,97^{a}$	0,92	$0,63^{a}$
	2T1	29^{a}	29^{ab}	36^{a}	32^{b}	6	6	8	6^{ab}	$2,05^{a}$	2,05	2,04	$1,94^{b}$	$0,79^{a}$	$0,79^{b}$	0,68	$0,75^{b}$
	2T2	36^{a}	29^{ab}	16^{a}	33^{b}	5	7	6	5^{ab}	$2,04^{a}$	2,00	2,15	$1,58^{b}$	$0,88^{a}$	$0,71^{b}$	0,83	$0,68^{b}$
	3T1	44^{b}	55^{b}	38^{a}	51^{c}	6	5	6	9^{b}	$1,62^{b}$	1,99	1,85	$2,24^{b}$	$0,62^{b}$	$0,85^{a}$	0,72	$0,71^{b}$
	3T2	47^{b}	35^{b}	30^{a}	45^{c}	5	3	2	7^{b}	$1,58^{b}$	1,42	1,00	$2,07^{b}$	$0,68^{b}$	$0,90^{a}$	1,00	$0,74^{b}$
	4T1	58^{c}	74^{c}	63^{b}	83^{d}	5	4	3	7^{b}	$1,47^{b}$	1,28	0,82	$1,59^{b}$	$0,63^{b}$	$0,64^{c}$	0,51	$0,57^{a}$
	4T2	60^{c}	72^{c}	59^{b}	86^{d}	6	4	4	10^{b}	$1,74^{b}$	1,14	1,05	$1,93^{b}$	$0,67^{b}$	$0,57^{c}$	0,53	$0,58^{a}$

S1 : Echantillonnage de Novembre ; S2 : Echantillonnage de Janvier ; S3 : Echantillonnage de Mars ; S4 : Echantillonnage de Mai. Différentes lettres indiquent des différences significatives ($p<0.05$).

Annexe 2 : Tableau d'abondance-dominance des espèces du site 1

	Novembre								**Janvier**								**Mars**								**Mai**							
	Transect 1				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**			
Zones	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Avena sp	1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	3	2	1	3	3	2	+	3	3	3	+	3	3	3	+	3	3	3	1	3	3	3
Ampelodesmos mauritanicus																		1				1					2	2			2	2
Anogramma leptophylla																								+								1
Daucus carota																											+	+			+	+
Centaurium spicatum		+				+										+		+	+			+										
Cerinthe major		+		1				1		1	+	1		1	+	1		1	1			1		+		1	+	1		1		
Conium maculatum	1	1	1		1	1	1			2	2	2		1	2	1	1	2	2	2	+	2	2	2		2	2	2		2	2	2
Foeniculum vulgare																							+									
Fraxinus angustifolia																	1	+	1		1	1	1		1	1	1		1	1		
Galactites tomentosa				1							1	1			2	1				+				1				1				1
Geranium robertanium			+	1			1	1								+					+			+				1				
Lathyrus sp																									1	1	1		1	1	1	+
Leontodon sp																							1				+				1	
Malva Sylvestris				1								+				1				+				+				1				1
Medicago sp																		+	1				1	+			+	+		1		
Oxalis pes-caprae	1	2	2	4	1	1	2	4		1	2	3			+	3		1	1	3		1	+	3		1		+		1		1
Plantago lanceolate																								+			1			1	+	
Rubus fruticosus																				+							+	1			1	1
Senecio vulgaris			1	1			1	+			+	+			+	1							+			1	2	+		1	2	1
Sonchus oleraceus																		1	2	1		+	2	2								1
Taraxacum sp																	+				+											
Trifolium tomentosum																											1	2		1	1	2
Vicia sativa		1				+						+					+	+	+	1	+	1	1	1								
Xanthium strumarium																									1				+			

Annexe 3 : Tableau d'abondance-dominance des espèces du site 2

	Novembre								**Janvier**								**Mars**								**Mai**							
	Transect 1				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**			
Zones	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Anagallis moneli																		+	+			+	+									
Avena sp	1	2	2	3	1	2	2	3		3	4	4		3	3	4	1	3	4	4		2	4	4		2	2	4		2	2	4
Beta vulgaris			1	+			+	+				+				+															
Bromus sp																									+	1	1	2	+	1	1	2
Bromus sp																												1				1
Chenopodium album																										2	2			2	2	
Conium maculatum	1	1	1	+	1	1	1	1		1	1			1	1		+	1	+		+	1	+		+	1	1		+	1	1	
Elymus repens																										+				1		
Fumaria capreolata																			1													
Galactites tomentosa			+	+		+	+	+		+	+			+	+			+	+	+		+	+	+		+	+	+		+	+	+
Hordeum murinum																											+					
Inula viscosa				+				+		1								1														
Lamium sp														+			+															
Lolium perenne																												1				1
Lysimachia sp						+																+	+			+	+			+	+	
Malva Sylvestris		1	2			1	1												+								+				1	
Medicago sp																										+	+			+	+	1
Oxalis pes-caprae	1	2	2	3	+	2	2	3		2	2	3		2	4	3	+	2	3	3	+	2	3	3			1			+	+	
Plantago lanceolate							+																									
Scolymus hispanicus												+				+								+				1				1
Senecio vulgaris										+								+				+	+				1				1	
Sonchus oleraceus		2				+																	+				1				1	
Xanthium strumarium	1				2				+				+				1				1				2	1	+		2	+	+	

Annexe 4 : Tableau d'abondance-dominance des espèces du site 3

	Novembre								**Janvier**								**Mars**								**Mai**							
	Transect 1				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**				**Transect 1**				**Transect 2**			
Zones	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Anagallis moneli											1								1								+					
Andryala integrifolia																																+
Avena sp	2	1	2	3	2	2	2	3	1	2	3	4	+	2	3	4	1	1	3	5		+	2	5	+	+	3	3		+	3	3
Beta vulgaris				+				1				+				+																
Bromus sp																									+	+	2	4		+	2	4
Bromus sp																												1				1
Conium maculatum	1	+	+		1	1	1		1	1	2		1	1	1			+	1			+					+		+			
Echium creticum																																+
Elymus repens		2	+	+		3		1		2				3				1				1				3	1	1		3	1	1
Fumaria capreolata														+																		
Galactites tomentosa																				+				1								
Hordeum murinum																										+	1	1			1	1
Inula viscosa					+																											
Lolium perenne																										+			+	+		
Malva sylvestris		+	+	+		1	+	+		+	+			+				+				+		+								+
Oxalis pes-caprae	1	1	3	3	1	1	4	3	+		4	3			4	3	+		3	2	+		4	2								
Phragmites australis																												+				+
Plantago lanceolate								+																								
Poa annua																		+														
Scolymus hispanicus												2				1											+	+			+	+
Senecio vulgaris										+								+	+													
Sonchus oleraceus		+	+				+			1				1				+	+			+										
Trifolium tomentosum																											+				+	
Xanthium strumarium	2				2				2				2	+			1	1			+	3			2	2	+		2	2	+	

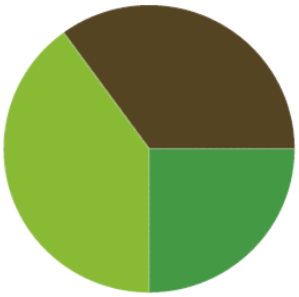
Annexe 5 : propriétés physico-chimiques du terreau utilisé dans le premier test de phytotoxicité

Greenyard Horticulture Belgium NV
Skaldenstraat 7a

B-9042 GENT
n° TVA BE 0426.540.969
Tel +32(0)9/218.03.30
Fax +32(0)9/218.03.31

Fiche Commerciale

Terreau professionel LP113AT



Description :
Terreau à base de tourbe horticole, tourbe blonde, engrais à base de calcium et magnésium et d'engrais. Matière séche : 25%, matière organique : 18%, pH (H2O) zone : 5-6,5, conductivité électrique (EC) : 550 µs/cm, engrais à base de N-P-K 12-14-24 avec des oligo-elements : 1 kg/CENm³, poids net: 550 kg/CENm³.

Composition - PPD G

- Tourbe horticole baltic, tamisé fin
- Tourbe horticole baltic, tamisé fin pour presse-mottes
- Tourbe blonde Baltic, fraction 0, 0/4 mm

Addition

dolokal PG
PGmix RHP N-P-K 12-14-24+ oligo-éléments

Structure

Norme	Valeurs cible	Unité
Cendres	3 - 17	%DS
Disponibilité en Eau (pF1 - pF2)	15 - 35	%Vol.
CEN-Densité	300 - 500	kg/m³ CEN
Matière sèche	20 - 40	%Brutoprod.
Rétrécissement	32 - 48	%Vol.
Volume d'air	3 - 9	%Vol.
Matière organique	83 - 97	%DS
Densité apparente	155 - 205	g/l
Porosité	88 - 92	%Vol.
Humidité	60 - 80	%Brutoprod.
Capacité de rétention en eau	450 - 650	g/100g DS
Volume d'eau à pF1	81 - 87	%Vol.
Volume d'eau à pF2	49 - 69	%Vol.

Les données fournies sur cette fiche sont purement indicatives et basées sur notre savoir actuel, elles expriment uniquement les caractéristiques générales du produit. Toutefois elles ne garantissent pas les caractéristiques du produit et ne contiennent pas d'obligations légales. Greenyard Horticulture se réserve toujours le droit d'ajuster la composition ou le produit, sans communication préalable. Aucune représentation ou garantie, soit explicite, soit implicite, n'est donnée concernant la vente, l'aptitude à un certain objectif, ou de quel genre que ce soit.

Annexe 6 : fiche technique du papier test huile qualitatif

Papier test Huile

fr

pour la détermination rapide d'huiles dans l'eau et / ou le sol

Réaction de coloration:

Au contact d'hydrocarbures, en particulier l'essence, le mazout, les huiles lubrifiantes etc., ce papier bleu pâle devient bleu foncé.

Mode d'emploi:

a) Détermination d'huile dans l'eau:

Pour la détermination d'huile dans l'eau, on agite plusieurs fois le papier test dans l'eau à tester ou on dépose une goutte de cet échantillon sur le papier test. En cas de présence d'huile, le papier devient bleu foncé. L'intensité et la taille des taches permet d'avoir une idée de la quantité d'huile. Une eau **exempte d'huiles** ne mouille ni décolore le papier.

b) Détermination d'huile dans le sol:

On presse le papier test contre l'échantillon de sol à étudier. Ensuite, on le rince avec de l'eau claire. Réaction de coloration voir ci-dessus. En cas de présence de plus grandes quantités d'huiles, l'huile pénètre à travers le papier jusqu'à la face non souillée de terre. Ainsi, le rinçage devient superflu.

Limite de sensibilité:

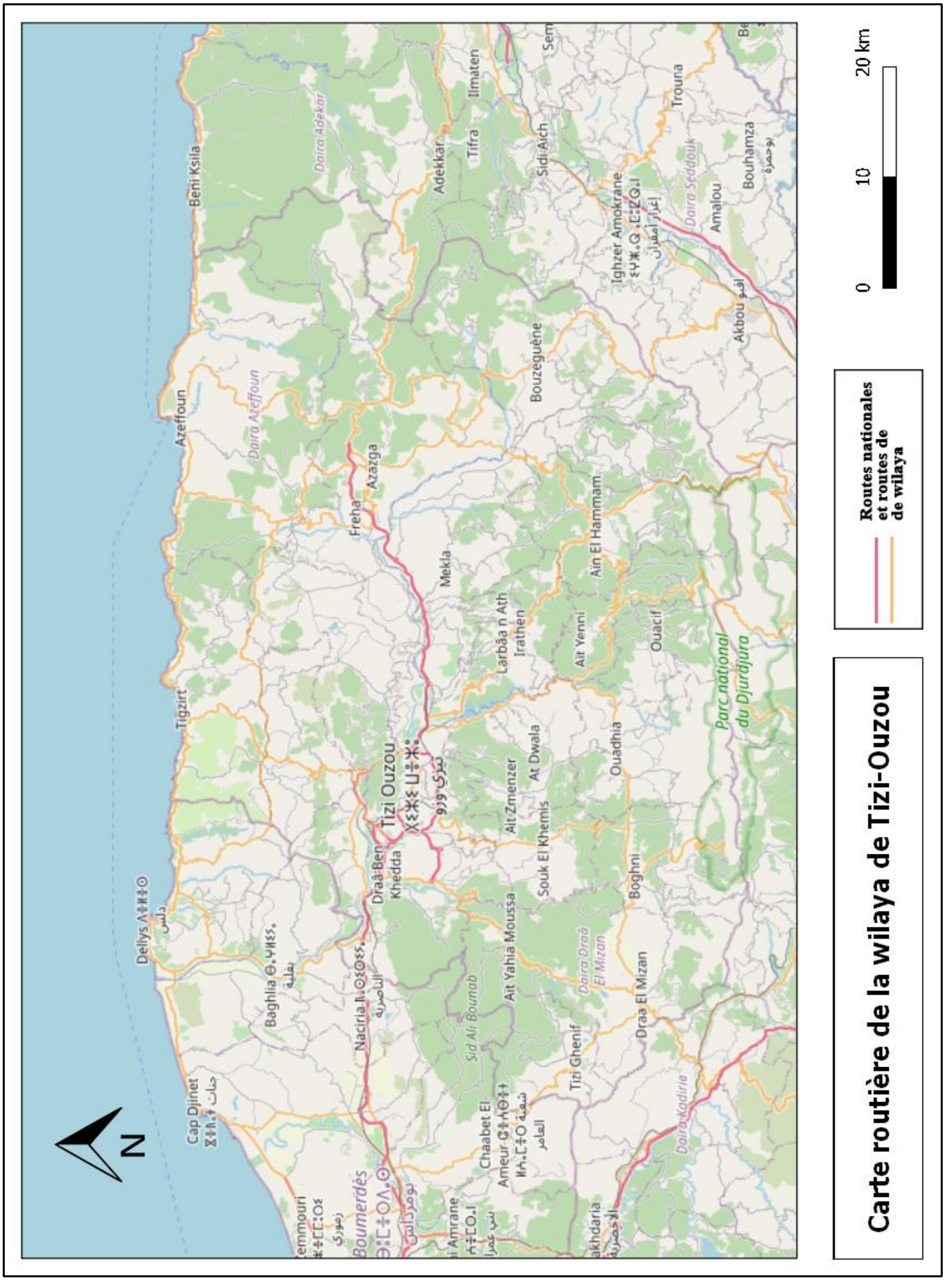
La sensibilité du papier test dépend dans une large mesure de la solubilité ou de la capacité de dispersion des hydrocarbures dans l'eau. Après agitation du papier test à la surface de l'eau, on peut déterminer les quantités suivantes:

Substance	Réaction de coloration	
	début de détermination (mg/L d'eau)	détermination nette (mg/L d'eau)
Ether de pétrole (Eb 40–80 °C)	250	400
Supercarburant	10	25
Mazout	5	10
Huile lubrifiante	1	5

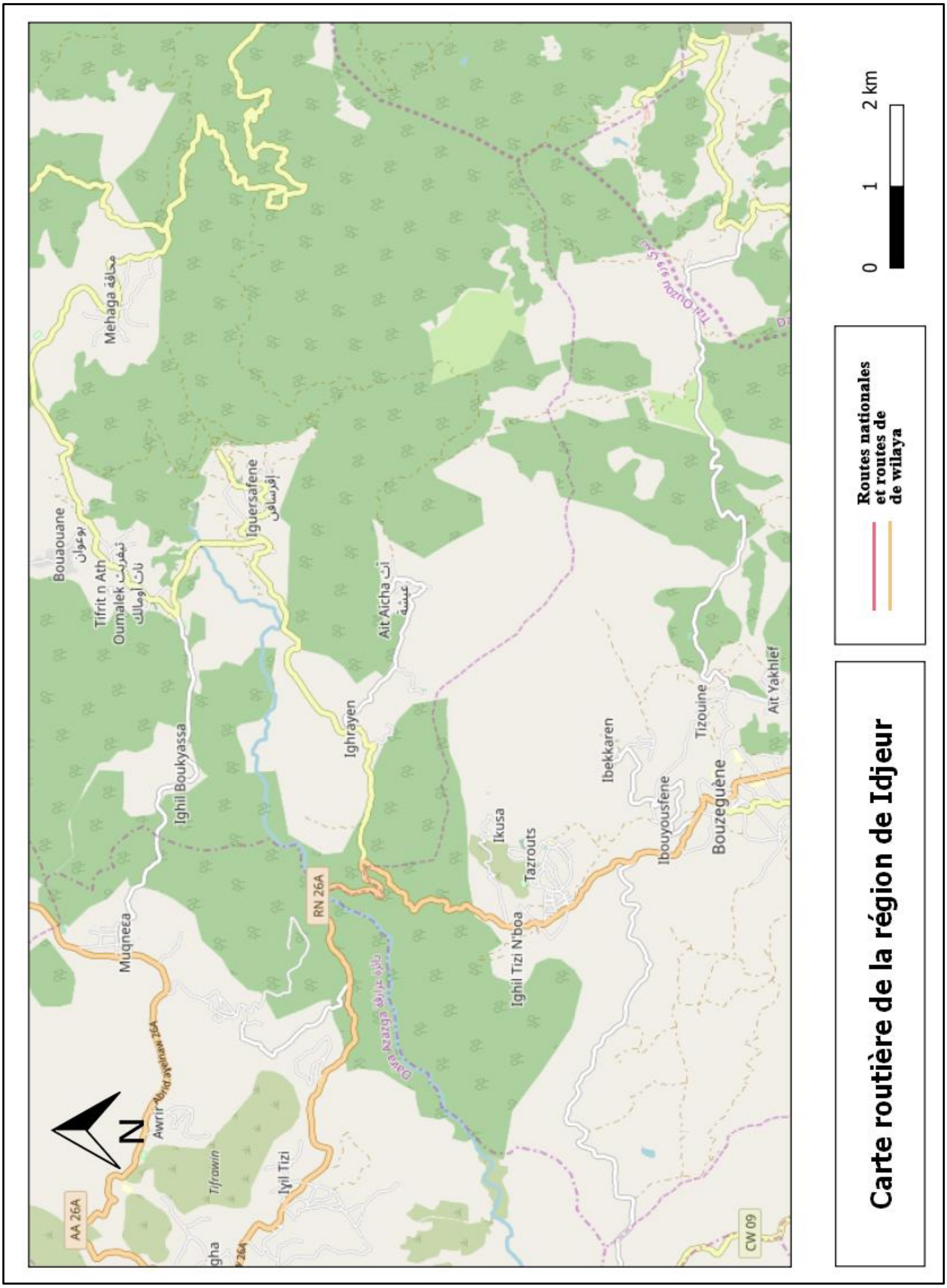
La réaction du papier test doit être étudiée instantanément dans le cas de substances très volatiles puisque le papier redevient rapidement pâle.

MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG
Neumann-Neander-Str. 6–8 · 52355 Düren · Allemagne
Tél. : +49 24 21 969-0 · Fax : +49 24 21 969-199 · info@mn-net.com · ***www.mn-net.com***

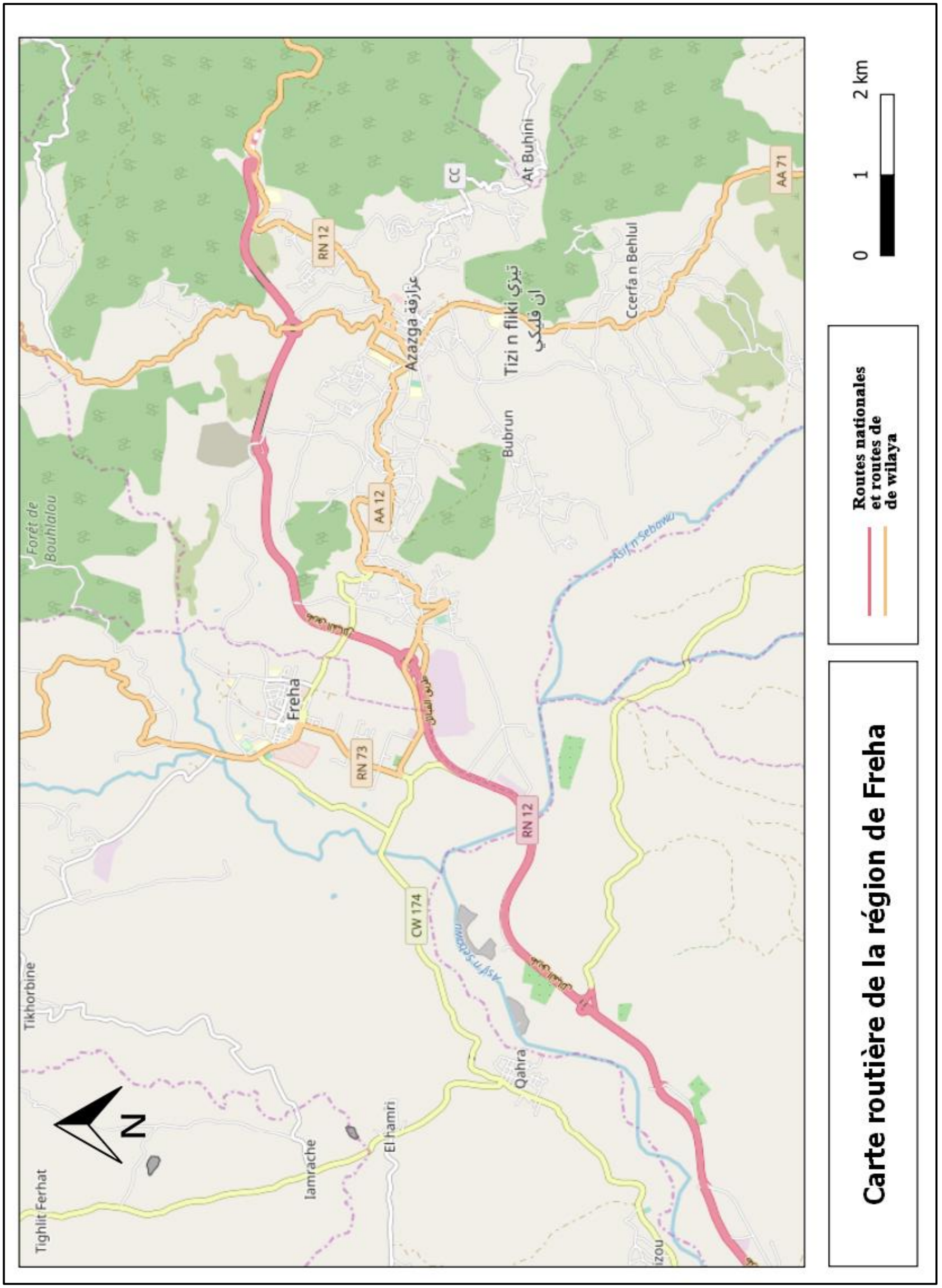
En France : MACHEREY-NAGEL EURL · 1, rue Gutenberg · 67722 Hoerdt · France
Tél. : 03 88 68 22 68 · Fax : 03 88 51 76 88 · sales-fr@mn-net.com



Annexe 7 : Carte routière de la wilaya de Tizi-Ouzou (OpenStreetMap, 2020)



Annexe 8 : Carte routière de la région de Idjeur (OpenStreetMap, 2020)



Annexe 9 : Carte routière de la région de Fréha (OpenStreetMap, 2020)