

REPOUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université
Mouloud Mammeri Tizi Ouzou
Faculté des sciences biologiques et des sciences Agronomiques
Département : Ecologie et environnement



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master



Filière : Écologie et environnement.

Spécialité : Biodiversité et environnement.

Thème

**Modélisation des caractéristiques physico-chimiques
des sols de deux stations-services (Freha et Azazga)**

Présenté par :

M^{elle} OUKHOUIA Lyza.

Soutenu le 02/07/2024

M^{elle} IBESAINÉ Melissa.

Devant le jury composé :

Présidente : Ali Ahmed S. MCB UMMTO

Promotrice : Sadoudi-Ali Ahmed D. Professeur UMMTO

Examineur : Landri-Ait Boudrare G. MAA UMMTO

Année universitaire :2023/2024

Remerciements

Nous remercions, tout d'abord, Madame **SADOUDI-ALIAHMED Djamila**, Professeur au département de Biologie de l'UMMTO pour nous avoir proposé cette thématique, nous avoir encadrés durant toute la durée du travail. Nous tenons à lui exprimer toute notre gratitude et notre reconnaissance pour avoir partagé ses connaissances dans ses domaines de compétences, pour ses conseils, sa disponibilité et pour son investissement dans ce travail de recherche.

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury Mme **ALI AHMED Samira** et Mme **LANDRI Ghenima** de l'UMMTO pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre recherche en acceptant respectivement de présider et d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs remarques.

Nous remercions toutes les personnes qui travaillent au laboratoire commun, au laboratoire de pédologie et au laboratoire de chimie pharmaceutique qui nous ont aidées dans notre travail. Nous remercions aussi l'ingénieur du laboratoire PSEMRVC, Madame Abrous H., qui a toujours été là pour nous, ainsi que le chef de service de laboratoire de pédologie de l'institut national de recherche forestière de Baïnem, Monsieur Saoud M. pour nous avoir réalisés les analyses physico-chimiques.

Nous tenons à remercier les responsables des deux stations-services de Freha et d'Azazga, de nous avoir autorisées à prélever des échantillons du sol au niveau de leurs stations.

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



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui m'ont toujours tout donné que dieu les protèges et les gardes en bonne santé.

À mes grands-parents paternels Ouerdia et Achour

À la plus formidable tante au monde Nadia et son mari et sa fille

À toute ma famille

À mes chères sœurs Kenza Salha

À mes chers frères Achour, Redoine

À ma chère binôme Melissa et sa famille

À ma meilleure copine Lamia

À tous mes amis

À toute la promotion de Biodiversité et environnement 2023_2024 sans exception.

À tous ceux et celles qui m'aiment.

RQA



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents : Tahar & Samia pour leurs soutien moral et matériel, que dieu tout puissant me les garde.

A mes grands-parents maternels et paternels ;

A mes très chères sœurs : Lyna, Hanane, Asma, Imane, Sedra et Amira ;

A mon cher frère : Sidati ;

A toute ma famille ;

A ma chère copine et binôme : Lyza et sa famille ;

A tous mes amis sans exception ;

A toute la promotion de Biodiversité et environnement 2023/2024

A toutes personnes qui m'a aidée de loin ou de près pour réaliser ce présent travail.

Melissa



Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure1	Horizons du sol	2
Figure2	Sources potentielles de pollution d'une station-service (Google).	9
Figure3	Vue satellitaire du site d'étude Freha (Google Earth, 2024).	12
Figure4	Vue satellitaire de la station-service "KaciSaid" de Freha (Google Earth, 2024)	13
Figure5	Localisation par satellite du site d'étude d'Azazga (Google Maps, 2024)	15
Figure6	Vue satellitaire de la station-service d'Azazga (Google Maps, 2024)	15
Figure7	Préparation de sols	18
Figure8	pH-mètre	19
Figure9	Mesure de la CE	19
Figure10	Titration des carbonates	22
Figure11	Titration des bicarbonates	22
Figure12	Titration des chlorures	22
Figure13	Triangle des textures de l'USDA(1986).	23
Figure14	Suspensions dans les éprouvettes	25
Figure15	Béchers dans le bain de sable	25
Figure16	Valeurs de pH des sols des deux stations	27
Figure17	Valeurs de la CE des sols des deux stations	28
Figure18	Taux du calcaire total des sols étudiés dans les deux stations	29
Figure19	Taux de carbone organique des sols des deux stations	30
Figure20	Taux de matière organique des sols des deux stations	31
Figure21	Taux de carbonates des sols des deux stations	32
Figure22	Taux de bicarbonates des sols des deux stations	33
Figure23	Taux de chlorures des sols des deux stations	33

Figure24	Taux d'humidité des sols des deux stations	34
Figure25	Composition granulométrique du sol d'Azazga.	35
Figure26	Résultats de la projection de la composition du sol sur le triangle de texture de l'USDA (1986) dans la station d'Azazga.	36
Figure27	Composition granulométrique des sols de Freha.	37
Figure28	Résultats de la projection de la composition du sol sur le triangle de texture de l'USDA (1986) dans la station Freha.	38
Figure29	Graphe ACP (variable) pour les paramètres physico-chimiques des sols étudiés	39
Figure30	Graphe ACP (individus) pour les paramètres physico-chimiques des sols étudiés	40
Figure31	Régression simple des propriétés du sol en fonction de la distance à la source	42
Figure32	Régression simple des propriétés du sol en fonction de la teneur en matière organique	43

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau1	Principaux constituants du sol (Soltner, 2005).	3
Tableau2	Variation des températures moyennes, maximales et minimales de la région de Freha en 2023.	14
Tableau3	Variation des précipitations moyennes annuelles de la région Freha (2016_2024)	14
Tableau4	Variation des températures moyennes mensuelles de la région d'Azazga (2016_2024)	16
Tableau5	Variation des précipitations moyennes annuelles de la région d'Azazga (2016_2024)	16
Tableau 6	Matrice de corrélation des propriétés physico-chimiques du sol et la distance à la source de pollution	41

Liste des abréviations

CE : Conductivité électrique.

SP1 : Sol pollué

SP2 : Sol peu pollué

SP3 : Sol loin de la source de pollution.

USDA: United States Department of Agriculture.

A: Azazga

F: Freha

R1 : répétition1

R2 : répétition2

Sommaire

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

Chapitre1 : Synthèse bibliographique

I. Généralités sur le sol.....	2
1-Définition du sol.....	2
2-Origine et constituants du sol.....	2
3-Fonctions du sol.....	4
4-Propriétés physico-chimiques du sol.....	4
II. Hydrocarbures.....	6
1-Définition des hydrocarbures.....	6
2-Origine des hydrocarbures.....	6
3-Composition des hydrocarbures.....	6
4-Classification des hydrocarbures.....	7
5- Carburants.....	7
6-Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures.....	8.
7-Source des hydrocarbures dans le sol.....	8
8-Comportement et devenir des hydrocarbures dans le sol.....	9
III. Pollution du sol par les hydrocarbures.....	9
1-Définition de la pollution.....	9
2-Principaux types de polluants.....	10
IV. Toxicité des hydrocarbures.....	10

Chapitre2: Matériel et Méthodes

I. Présentation des deux zones d'étude.....	12
• Choix des deux stations d'étude.....	12
1-Freha.....	12
1.1-Étude climatique.....	13
2-Azazga.....	14
2.1 Étude climatique.....	15
II. Matériel et méthodes.....	16
1-Matériel.....	16
2-Méthode échantillonnage.....	17
3-Traitement et préparation du sol.....	17
III. Analyse physico-chimique des échantillons.....	18
1- Mesure de pH.....	19

2- Détermination de la conductivité électrique.....	19
3- Calcaire total.....	20
4- Carbone organique.....	20
5- Matière organique.....	21
6- Dosage des anions (les sels solubles).....	21
7- Humidité hygroscopique du sol.....	22
8- Granulométrie.....	23
IV. Analyse statistique.....	25

Chapitre3 : Résultats et discussion.

III. Résultats et discussion des analyses physico-chimiques du sol prélevé dans les deux stations d'étude Azazga et Freha.....	26
III.1. Paramètres chimiques.....	26
III.1.1-Potentiel hydrogène (pH).....	26
III.1.2-Conductivité électrique.....	27
III.1.3-Calcaire total.....	28
III.1.4- Carbone organique.....	29
III.1.5-Matière organique.....	30
III.1.6-Sels solubles.....	31
III.2. Paramètres physiques.....	34
III.2.1-Humidité.....	34
III.2.2-Granulométrie.....	35
III.3. Analyse en composantes principales (ACP).....	39
IV. Modélisation des paramètres physico-chimiques des sols des deux stations-services ...	41
Conclusion et perspectives.....	45
Référence bibliographiques	
Annexes	
Résumé	

Le sol est un milieu naturel composé d'un mélange des éléments présents à l'état gazeux, aqueux et solide. Les différentes caractéristiques génétiques et environnementales des sols varient considérablement. Cependant, ils sont considérés généralement comme des réservoirs d'eau et de nutriments qui favorisent la croissance des plantes et des micro-organismes (**Lee et al., 2020**). Le sol est également indispensable pour le bon fonctionnement des écosystèmes terrestres. Il s'agit d'une ressource essentielle à protéger contre l'accélération de sa détérioration due souvent aux activités humaines. Cette protection passe avant tout par le développement des recherches dans ce domaine scientifique clé : la pédologie (**Gobat et al., 2010**).

Les hydrocarbures sont les polluants du sol les plus dangereux et ils sont la principale source d'énergie à l'échelle mondiale. De par leur toxicité et leur persistance dans l'environnement, ils constituent un véritable risque pour la santé humaine (**Ali Ahmed, 2011**).

Il est essentiel de comprendre les risques environnementaux associés à la production des hydrocarbures afin de faire face aux pollutions causées par ces derniers. Parmi les pollutions les plus spectaculaires, on retrouve les déversements de fluides tels que le pétrole brut, le gasoil, le fuel, l'essence et le kérosène (**Le Comte, 1998**).

En cas de déversement d'hydrocarbures, leur impact sur l'environnement sera influencé par leurs caractéristiques physico-chimiques ainsi que par les différents processus de transport et d'altération liés aux conditions environnementales dans le milieu récepteur (température, vagues, vents) (**CEAEQ.2015**)

Notre étude s'intéresse aux sols pollués par les rejets des stations-services. Ce travail vise à modéliser les caractéristiques physico-chimiques des sols pollués par les carburants de deux stations-services de la wilaya de Tizi-Ouzou à savoir Freha et Azazga

Le présent mémoire est réparti en trois chapitres dont le premier consiste en une revue bibliographique relative au sol, aux hydrocarbures et à la pollution du sol.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les sites d'études, le matériel utilisé et les méthodes suivies dans la caractérisation des sols.

Le troisième chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus et leurs interprétations. Nous terminons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

I. Généralités sur le sol

Les sols sont des systèmes asphaltiques complexe set variés, qui incluent de l'air, de l'eau et des substances solides telles que le sable, le limon, l'argile, la matière organique, les nutriments, etc. Ils sont également des médias ouverts et en constante évolution, échangeant de la matière et de l'énergie avec l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère (**Sposit, 1997**).

1. Définition du sol

Le sol est la couche superficielle meuble de la lithosphère terrestre, présentant une épaisseur variable de quelques centimètres à plusieurs mètres. Il est constitué par un mélange de matériaux minéraux et organiques, et il sert de support et de milieu naturel pour la croissance des plantes (**Legros, 2007**).

2. Origine et constituants du sol

Le sol est le résultat de la décomposition et de la transformation des roches par l'eau, l'air et les organismes vivants (**Soltner, 2005**). Il apparaît, s'approfondit et se différencie en strates superposées : les horizons pédologiques qui forment le profil pédologique (Figure 1). Il atteint un état d'équilibre avec la végétation et le climat (**Lozet et Mathieu, 1997**).

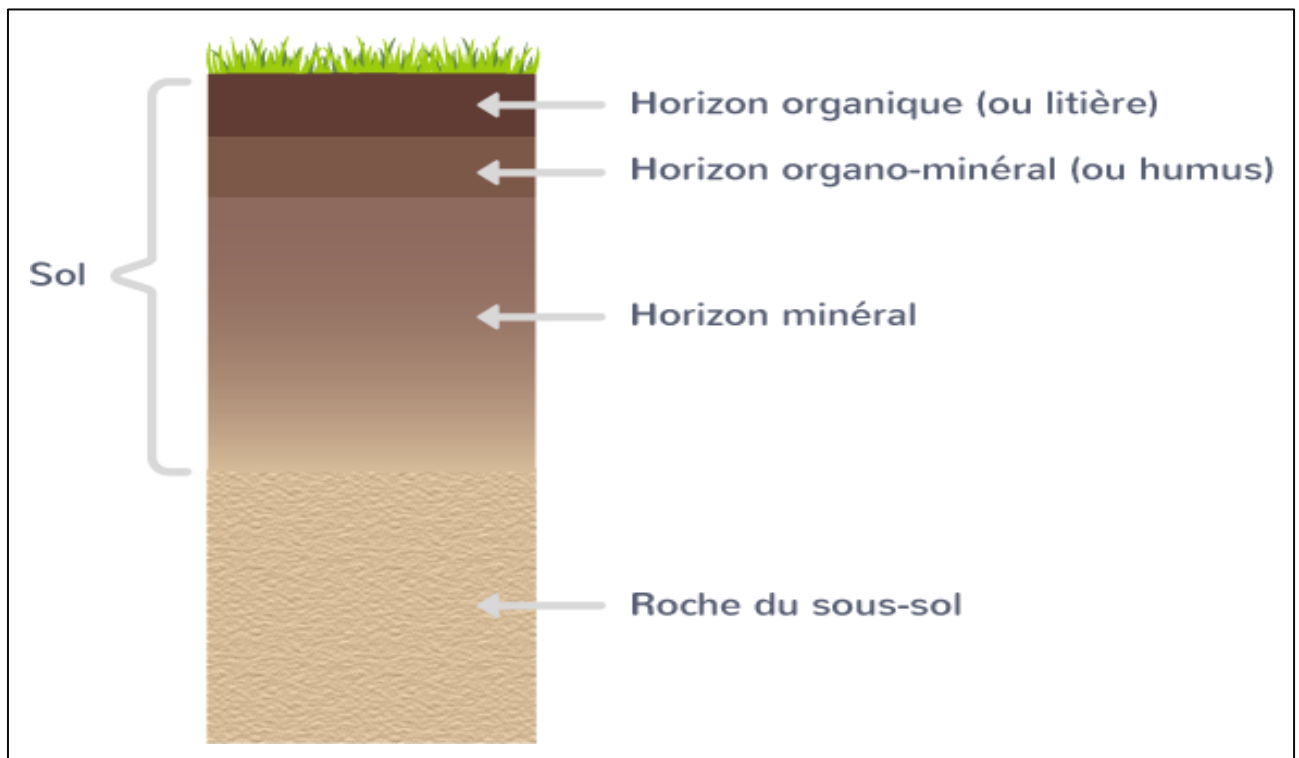


Figure1 : Horizons du sol (<https://www.kartable.fr/>).

Les principaux constituants du sol sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Principaux constituants du sol (Soltner, 2005).

	Constituants solides		Constituants liquides (solution du sol)	Constituants gazeux (atmosphère du sol)
	Minéraux	Organique		
Origine	Désagrégation physique et altération biochimique des roches.	-Décomposition des êtres vivants.	-Précipitation, nappes, ruissellement.	-Air hors sol, matière en décomposition, respiration.
Critères de classement	-Taille (granulométrie). -Qualité (minéralogie).	-État (vivant, mort). -Qualité chimique (originelle, transformée).	-Origine (météorique, phréatique). -État physique (potentiel hydrique). -Qualité chimique.	-Origine (air, organisme). -Qualité chimique.
Catégories	Selon la granulométrie : Le squelette (>2mm). la Terre fine (<2mm). Selon la minéralogie : • Quartz • Minéraux silicatés • Min carbonaté.	-Organismes vivants et morts. -Matière organique : • Héritée : cellulose, lignine, résine. • Humiliées : acides fluviales et humique, hémiques.	-Eau. -Substances dissoutes : • Glucides. • Alcools. • Acides. • Minéraux. • Organiques. • Cation. • Anions.	-Gaz de l'air : N ₂ , O ₂ , CO ₂ . -Gaz issu de la décomposition des organismes : CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , NH ₃ .

3. Fonctions du sol

Le sol est un écosystème qui joue de nombreux rôles. Il constitue une base pour les organismes vivants, un stockage de matières organiques et minérales, un système de régulation des échanges et des flux de la matière organique, ainsi qu'un système d'épuration des substances toxiques. Le sol est la source de nourriture du monde : il génère et stocke tous les éléments essentiels à la vie (azote, phosphore, calcium, potassium, fer, oligoéléments...), y compris l'air et l'eau (**Ruellan et Poss, 2008**).

4. Propriétés du sol

4.1. Propriétés physiques du sol

4.1.1. Texture

La texture du sol est la base de toutes les autres propriétés. Il s'agit de la propriété qui exprime de façon globale la granulométrie de la terre fine (**Gobât et al., 2010**).

La texture du sol fait référence à la grosseur et à l'organisation des particules de sable, de limon et d'argile qui le composent. On classe ces particules selon leur diamètre ; les particules de sable fin étant les plus grosses et les particules d'argiles les plus fines (**Ponge et Robert, 1996**).

4.1.2. Structure

C'est le mode d'arrangement spatial des constituants solides (minéraux et organiques). En fonction de la présence ou de l'absence d'agrégats, on distingue trois types de structures : élémentaire, fragmentaire et compacte (**Duchauffour et al., 2018**).

4.1.3. Porosité

La porosité d'un sol est une mesure physique qui mesure la proportion entre le volume des pores et le volume total du sol. La porosité totale est définie par l'équation suivante selon **Calvet(2003)** :

$$\theta_t = 1 - v_s / v_a$$

v_s : Le volume qui est directement aperçu

v_a : Le volume occupé par les particules du sol

4.1.4. Perméabilité

Elle représente la vitesse à laquelle l'eau circule dans les cavités les plus grandes du sol sous l'action de la gravité ; elle varie selon les horizons (**Charnel., 2018**)

4.2. Propriétés chimiques du sol

4.2.1. pH du sol

Il s'agit d'une mesure physique sans unités qui varie de 0 à 14 et qui permet de déterminer si une solution est acide, basique ou neutre. L'eau et toutes les solutions aqueuses contiennent des ions hydrogènes (H^+) responsables de l'acidité et hydroxydes (OH^-) responsables de la basicité (**Hong et al., 2018**).

4.2.2. Humidité du sol

C'est un élément important de l'environnement, qui représente la quantité d'eau qu'un sol non saturé, accumule. Elle fournit des informations sur la facilité de croissance et de la vie de la végétation (**Jounard et al., 2018**).

4.2.3. Matière organique

La matière organique se présente dans le sol, d'une part, sous la forme de résidus végétaux plus ou moins reconnaissables, et d'autre part, sous la forme de substances qui adhèrent à la fraction minérale (**Henin et al., 1969**). La présence de la fraction organique joue un rôle essentiel en apportant une certaine cohésion aux particules de terre. Ces différentes actions varient en fonction de la nature des matières organiques (**Henin, 1976**).

4.2.4. Calcaire dans le sol

Le calcaire peut se trouver dans le sol à l'état de fragments de dimensions quelconques depuis les blocs et les graviers jusqu'à la taille des colloïdes argileux. Généralement, les fragments sont des parties de la roche-mère. Il arrive aussi que le calcaire ait une origine biologique et qu'il soit constitué, partiellement ou en totalité, par des coquilles de gastéropodes (hélicidés) (**Deuris et Fréras, 1984**).

4.2.5. Conductivité électrique

C'est un indice de la quantité de sels solubles présents dans le sol. Son degré de salinité est une mesure approximative de la concentration des solutions ionisables présentes dans l'échantillon. Les concentrations en cations et anions porteurs de charges électriques augmentent, ce qui entraîne une augmentation de cette propriété électrochimique d'une solution (**Clément, 1998**).

4.2.6. Capacité d'échange cationique (CEC)

Elle désigne la capacité d'un sol à retenir des cations de manière échangeable. Les sols possèdent une capacité d'échange cationique qui est bénéfique et captivante. Cette fonctionnalité est bénéfique car elle permet de définir les sols en ce qui concerne la régulation des compositions ioniques de la solution du sol. Elle est captivante car elle est associée à des polluants métalliques (**Calvet, 2003**).

Le CEC des sols est très variable en fonction de leur composition ; elle est d'ailleurs souvent très positivement corrélée à la teneur en argiles (**Baise, 2000**).

II. Hydrocarbures

1. Définition des hydrocarbures

Au sens chimique du terme, les hydrocarbures sont des composés organiques qui ne contiennent que du carbone (C) et de l'hydrogène (H), qui sont combinés en molécules d'une grande variété, allant de la plus simple à la plus complexe (**Bocard, 2006**). Leur formule brute est $C_n H_m$.

Ils sont émis dans l'environnement via les phénomènes naturels et via les activités anthropiques.

2. Origine des hydrocarbures

Selon **Battaz (2009)**, les hydrocarbures se forment dans l'environnement via les ressources

- Anthropiques représentées par le transport, responsable de 89% des émissions d'hydrocarbures ; le chauffage ; l'exploitation des ressources naturelles ; l'extraction ; les émissions telluriques provenant de la terre apportées par les cours d'eau.
- Naturelles consistant en des débris d'algues, résidus de la faune marine et des planctons atmosphériques.

3. Composition des hydrocarbures

Sur le plan chimique, le pétrole brut est défini comme un mélange complexe de composés principalement constitué d'hydrogène et de carbone (**Koshlaf et Ball, 2017**).

Les composants non-hydrocarbures comprennent des composés soufrés, des composés azotés et des composés oxygénés. Il est également possible de trouver certains métaux, et ces composés hétéros sont principalement présents dans les composants non volatils des hydrocarbures pétroliers (**Ossaïetal., 2020**).

4. Classification des hydrocarbures

a. Hydrocarbures aliphatiques

Ces molécules peuvent être linéaires ou ramifiées à longue chaîne, saturées (Alcanes) ou insaturées (Alcènes ou alcynes), et elles peuvent être substituées ou non. Les nappes souterraines sont fréquemment couvertes de ces produits, qui sont plus ou moins volatils et toxiques. Leur dégradation est rapide lorsque les chaînes sont droites (**Arnaud, 2004**). On les utilise fréquemment tant qu'agents de dégraissage et de solution de nettoyage industriel (**Su et al., 2013**).

b. Hydrocarbures cycliques

Il s'agit de composés qui forment une sorte de boucle fermée dans la chaîne carbonée, tels que les cyclo alcanes **saturés** et les cyclo alcanes **insaturés**. Il y a une grande variété de structures cycliques (**Arnaud, 2004**).

4.3. Hydrocarbures aromatiques

Les hydrocarbures aromatiques correspondent aux hydrocarbures mono-aromatiques (benzène et ses dérivés mono-alkyles, poly-alkyles et cyclo-paraffinés) et aux hydrocarbures poly-aromatiques de 2 à 7 cycles (**Bocard, 2006**). Il s'agit de composés produits lors du traitement du pétrole brut, qui représentent, en moyenne, entre 26 et 30% des composants du pétrole (**Koshlaf et al., 2017**).

4.4. Produits raffinés

Les produits raffinés représentent les produits issus du processus de raffinage du pétrole et correspondent à l'ensemble des transformations de sa structure physique et chimique, dans le but d'obtenir le plus grand nombre de produits à haute valeur commerciale. Le pétrole est modifié moléculairement pour produire des produits lourds (fuel-oil, bitume), des distillats (gasoil) et des produits légers (essence) (**Begbeg, 2008**).

5. Carburants

5.1. Essence

L'essence est un terme générique employé pour désigner les carburants pétroliers volatils inflammables. Les aromatiques représentent environ 50 % de la teneur totale en hydrocarbures dans l'essence, les ISO-alcanes environ 35 % d'alcanes, les alcènes et les cyclo alcanes représentent de petites quantités. (**Ahmed et Fakhruddin, 2018**).

a. Gasoil

Le gasoil est composé d'un ensemble de différents hydrocarbures. Il est plus lourd que l'essence et il renferme moins de substances volatiles. Il est principalement constitué de n-alcanes et de cyclo alcanes et ne contient pas d'alcanes (**Saada et al., 2005**).

6. Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures

Selon **Lumière et al., 2008**, le nombre d'atomes de carbone des molécules qui composent la coupe d'hydrocarbures influence les propriétés physico-chimiques des hydrocarbures. Une augmentation du nombre d'atomes de carbone se manifeste par :

- Une réduction de la solubilité, de la biodégradabilité et de la volatilité.
- Une augmentation de la densité de l'hydrophobie (adsorption) et de la stabilité.

6.1. Densité

La densité des hydrocarbures est la quantité de masse par volume. L'industrie pétrolière utilise cette propriété afin de distinguer les hydrocarbures légers des hydrocarbures lourds (**Radovic et al., 2012**).

6.2. Viscosité

La résistance à l'écoulement indique que les hydrocarbures à haute viscosité sont difficiles à écouler, tandis que ceux qui sont très fluides sont ceux du cas inverse. Cette propriété dépend de la température et s'exprime en (mPa.s) (**Archazmbault et al., 2017**).

6.3. Point d'écoulement

C'est la température inférieure à laquelle un hydrocarbure ne se décompose plus lorsque la température ambiante est inférieure à son point d'écoulement ; le produit se comporte comme un solide (**Gruyer et al., 2015**).

6.4. Solubilité

La solubilité d'une substance représente sa capacité à se dissoudre dans l'eau. Plus la proportion d'hydrocarbures légers dans l'eau est élevée, plus elle sera importante (**Fingas, 2013**).

7. Source des hydrocarbures

❖ Cas des stations-services

Les stations-services sont une source importante de pollution urbaine. L'exploitation de ce type d'activités représente une source potentielle de nuisance pour le voisinage direct, mais aussi pour l'environnement, en général.

- La contamination des sols et dessous-sols causés par les stations-services se divise en deux catégories ;
- La présence d'une pollution chronique sur une longue période est généralement causée par la corrosion des cuves et des canalisations d'entrée (Figure 2).

- Le déversement d'hydrocarbures lors du remplissage des stocks de la station ou de la distribution de carburant peut causer une pollution accidentelle (Carnicer, 2007).

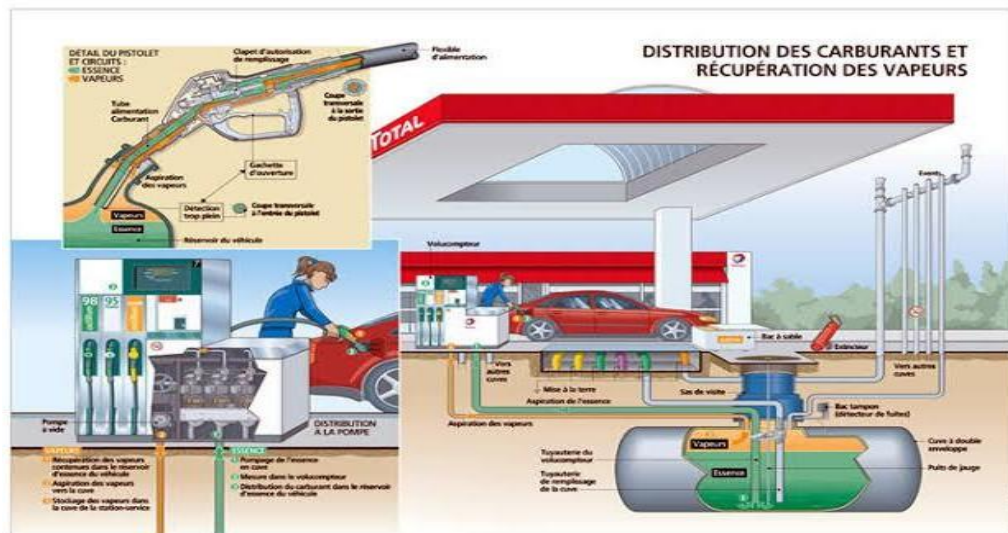


Figure2 : Sources potentielles de pollution d'une station-service (Carnicer, 2007).

8. Comportement et devenir des hydrocarbures dans le sol

Les composantes des produits pétroliers ou hydrocarbures, sont soumises à divers processus chimiques et physiques qui influencent leur comportement (Gomez, 2010). On regroupe ces processus en trois catégories :

- Mécanismes qui conservent la masse : volatilisation, adsorption, dissolution, diffusion et dispersion ;
- Mécanismes des structures : altération biologique ou chimique ;
- D'autres mécanismes appelés dilution prennent en considération les effets de différents phénomènes climatiques, qui entraînent une diminution de la concentration de contamination, généralement sous l'effet d'infiltration d'eau de pluie (Gomez, 2010).

III. Pollution du sol par les hydrocarbures

1. Définition de la pollution

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui peut être considérée, entièrement ou partiellement, comme un résultat de l'action humaine, à travers des effets directs ou indirects qui modifient les critères de répartition des flux d'énergies, les niveaux de radiation, la composition physico-chimique du milieu naturel et l'abondance des biotopes (Ramade, 1992)

1.1. Définition d'un sol pollué

Un sol est pollué lorsqu'il renferme une concentration anormale de substances chimiques susceptibles de représenter un danger pour la santé des plantes ou des animaux (**Orée, 2021**).

1.2. Définition d'un polluant

Un polluant est une substance ayant des conséquences néfastes sur l'ensemble ou une partie d'un écosystème ou de l'environnement en général. Un polluant peut prendre la forme d'un gaz, d'un aérosol, d'un liquide ou d'un solide, qu'il s'agisse d'un produit humain ou naturel (**Tétreault, 2016**).

2. Principaux types des polluants

2.1. Polluants organiques

Les hydrocarbures sont les polluants organiques les plus importants et les plus fréquemment présents dans la pollution des sols. Les HAP, les polychlorobiphényles (PCB), les polychlorodibenzo_dioxines (PCDD), les composés organiques volatils (COV) et les pesticides sont des exemples (**Benfardia et Chenine, 2014**).

2.2. Polluants inorganiques

Ils forment un ensemble d'éléments qui ne se dégradent pas naturellement, s'accumulent et sont toxiques lorsqu'ils sont en grande quantité. Le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn) sont les plus couramment utilisés. Ils se trouvent naturellement dans le sol à des concentrations généralement faibles et sont principalement causés par l'altération de la roche mère. Cependant, les activités humaines telles que l'agriculture, le trafic routier et l'incinération d'ordures peuvent entraîner une augmentation de leurs concentrations naturelles (**Benfardia et Chenine, 2014**).

IV. Toxicité des hydrocarbures

1. Effets sur les propriétés physiques du sol

Les recherches sur les effets des hydrocarbures sur les caractéristiques physiques du sol sont très limitées, mais **Mattauer et al. (1987)** cité par **Fazzani et Khider, 2007** soutiennent l'idée que la présence des hydrocarbures améliore la stabilité structurale du sol, augmente sa capacité à retenir l'eau et diminue sa capacité à se mouiller.

Rouquerol et al., 1987 ont montré que les hydrocarbures enveloppent les particules minérales et garantissent leur dispersion en bouchant les pores. Les hydrocarbures ont la capacité de réduire considérablement la perméabilité des sols (**Colin, 2000**).

2. Effets sur les propriétés chimiques du sol

La qualité biologique d'un sol est déterminée par ses propriétés chimiques. En cas de perturbation de ces caractéristiques, il est possible que la qualité biologique d'un sol soit diminuée. **(Gros, 2004).**

Une légère acidification du sol (de 2à3dixièmes) peut être attribuée à l'émergence de faibles quantités d'acide, soit en raison de l'oxydation des n-alcanes, soit de composés provenant de la sécrétion du noyau aromatique. La composition chimique du sol varie peu en fonction des principaux éléments.

L'augmentation de la conductivité électrique (CE) entraîne l'inhibition de certaines plantes très sensibles à la présence des sels **(Karaginnidis, 1999).**

3. Effets des hydrocarbures sur l'environnement et la santé humaine

L'étude de l'évolution des hydrocarbures dans les phases liquides et gazeuses du sol révèle que les terrains contaminés entraînent une propagation de la contamination, que ce soit par voie aérienne, entraînant la migration de poussières contaminées et de vapeurs, ou souterraine, par la migration d'eau contaminée, aux environs immédiats du site, ou encore par la présence de populations humaines **(Fattal, 2008)**

Les hydrocarbures pétroliers ne sont pas directement contaminants pour l'homme. En consommant des aliments d'origine végétale ou animale, qui ont été exposés à des hydrocarbures, il peut être exposé à l'intoxication par ces produits par inhalation ou ingestion directe. Il s'agit d'une consommation extrêmement risquée en raison de l'effet de sommation **(Gougam, 1990)**

De nombreux rapports à travers le monde ont démontré les conséquences néfastes des hydrocarbures pétroliers présents dans le sol sur la santé des individus, tels que des troubles psychologiques, une irritation des voies respiratoires, des problèmes cutanés et rénaux, ainsi que des perturbations des groupes sanguins **(Jeevanantham et al., 2019 ; Da Silva et Maranhão, 2019).**

Matériel et Méthodes

I. Présentation des deux stations d'étude

• Choix des deux stations

Notre choix s'est porté sur les deux stations-services de Freha et d'Azazga en raison de l'accessibilité et la proximité et l'accord des gérants de ces stations pour faire l'échantillonnage du sol.

1. Freha

Freha est une commune algérienne de la wilaya de Tizi Ouzou dans la région de Kabyle. Elle se trouve à 31 km à l'Est de Tizi Ouzou, à 7 km à l'Ouest d'Azazga et à 32 km au Sud-ouest d'Azeffoun sur l'axe de la route nationale N°73 reliant la ville de Tizi-Ouzou à celle d'Azeffoun (Figure 3).

La commune est administrée par la ville de Freha, qui fait partie de l'arche d'Ait Djennad. Elle se trouve au cœur de la wilaya de Tizi Ouzou et est limitrophe des communes suivantes : Aghrib au Nord, Azazga à l'Est, Mekla et Tizi Rached au Sud et, enfin, Tizi Ouzou, Ouaguenoune et Timizart à l'Ouest.

Le territoire communal de Freha couvre une superficie de 68,55km². Il se trouve, en partie, dans le bassin versant sud de la chaîne côtière. La commune s'élève en moyenne à 350m.

Selon DUC Tizi Ouzou (2011), il offre une géographie à double dimension : les plaines et les montagnes. La commune de Freha se situe entre 36°45'43'' Nord et 4°18'59'' Est, à une altitude de 350m.

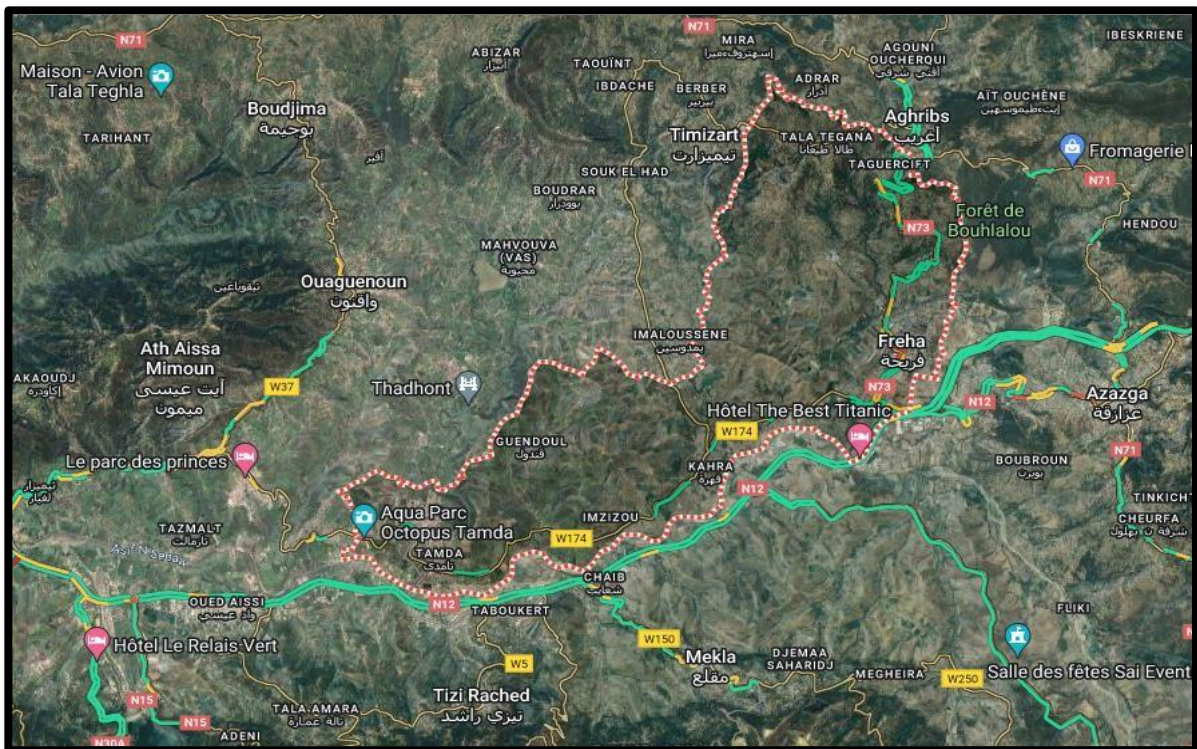


Figure3 : Vue satellitaire du site d'étude Freha (Google Earth, 2024).

La figure 4 présente la situation géographique de la zone d'étude

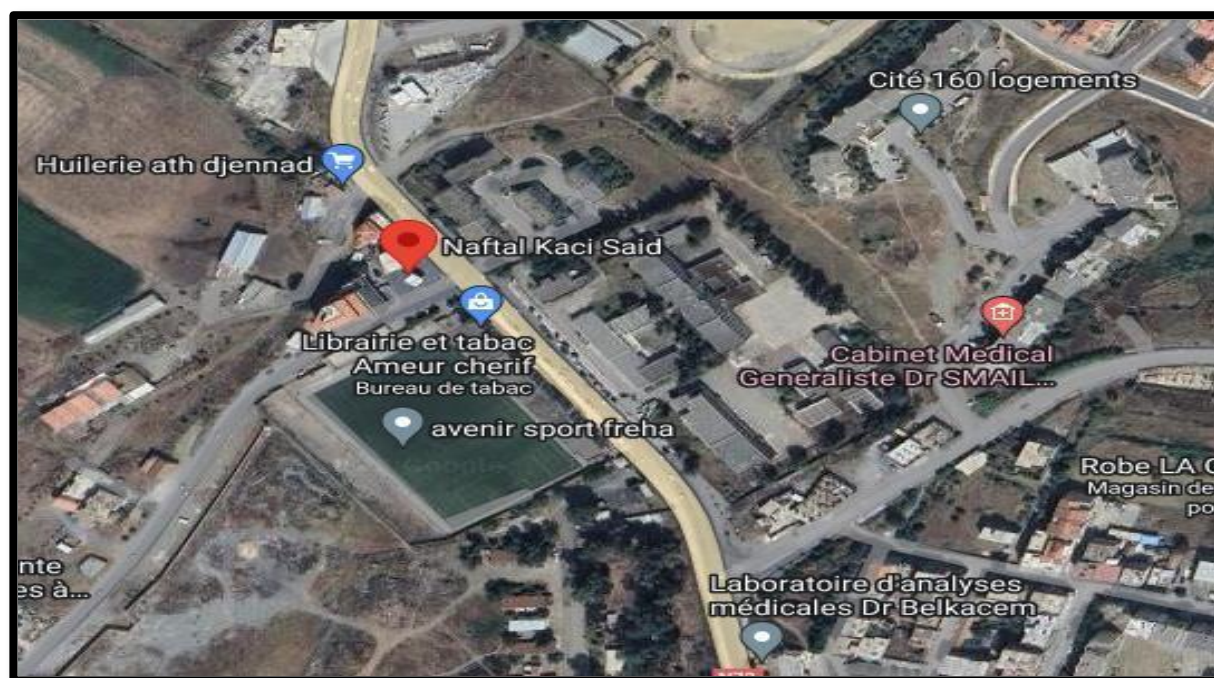


Figure4 : Vue satellitaire de la station-service «Kaci Saïd» de Freha (Google Earth, 2024).

1.1. Etude des paramètres climatiques

- Climat

Selon **Ramade (1992)**, le climat joue un rôle crucial dans l'adaptation des caractéristiques écologiques des écosystèmes.

La commune de Freha possède un climat méditerranéen de type continental avec des hivers froids et des étés chauds. La température moyenne est inférieure à 9°C en hiver et s'élève à 34°C en été (**Lamiri et Nezlioui, 2017**).

- Température

Selon **Ramade (1992)**, les températures jouent un rôle limitant, car elles régulent tous les processus métaboliques et influencent ainsi la répartition de toutes les espèces et les communautés d'êtres vivants dans la biosphère.

Le tableau 2 présente les températures moyennes de Freha en 2023.

Tableau2 : Températures moyennes de la région de Freha en 2023(<https://en.climate-data.org/>).

les mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
T°moy	9.8	11.7	14.2	17.9	21.8	25.5	28.6	28.3	25.8	21.2	15.7	12.1

Selon le tableau ci-dessus, nous constatons que, dans la région de Freha, le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une moyennede28,6°C tandis que le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une moyenne de 9.8°C.

- **Pluviométrie**

Le tableau présente la pluviométrie la région de Freha (2016-2024).

Tableau3 : Précipitations moyennes, annuelles de Freha durant la période 2016-2024(<https://fr.weatherspark.com/>).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
PM (mm)	71.4	63.2	50.2	44.0	31.0	9.3	2.9	7.6	24.2	38.9	64.6	76.2

- ✓ La saison des pluies à Freha s'étend d'octobre à avril, avec les précipitations les plus importantes en novembre et décembre de l'ordre de 64.6mm et 76.2 mm respectivement.
- ✓ La saison sèche s'étend de mai à septembre, et le mois de juillet est le plus sec avec une valeur de 2.9 mm.

2. Azazga

Azazga est une commune de la wilaya de Tizi-Ouzou, située en Kabylie dans le nord de l'Algérie. Elle est située à environ 30km au sud-est de la ville de TIZI-OUZOU sur l'axe de la route nationale N° 12 reliant la wilaya de Tizi-Ouzou à celle de Bejaia (figure 5).

La région d'Azazga est située dans une vallée entourée de montagnes. Elle est traversée par l'Oued Sébaou, qui est une importante source d'eau pour l'agriculture et l'approvisionnement en eau potable de la région. Elle est délimitée ;

Au nord par les communes d'Aghribs et Akerou ;

A l'est par la commune de Yakouren ;

A l'ouest par la commune de Freha ;

Au sud par les communes de Mekla, Ait Khelil et Souamaa.

La commune d'Azazga se situe entre $36^{\circ}44'43''$ Nord et $4^{\circ}22'16''$ Est, à une altitude qui varie de 150 à 1014m.



Figure 5 : Localisation par satellite du site d'étude d'Azazga (Google Maps, 2024).

La figure 6 présente la situation géographique de la zone d'étude,

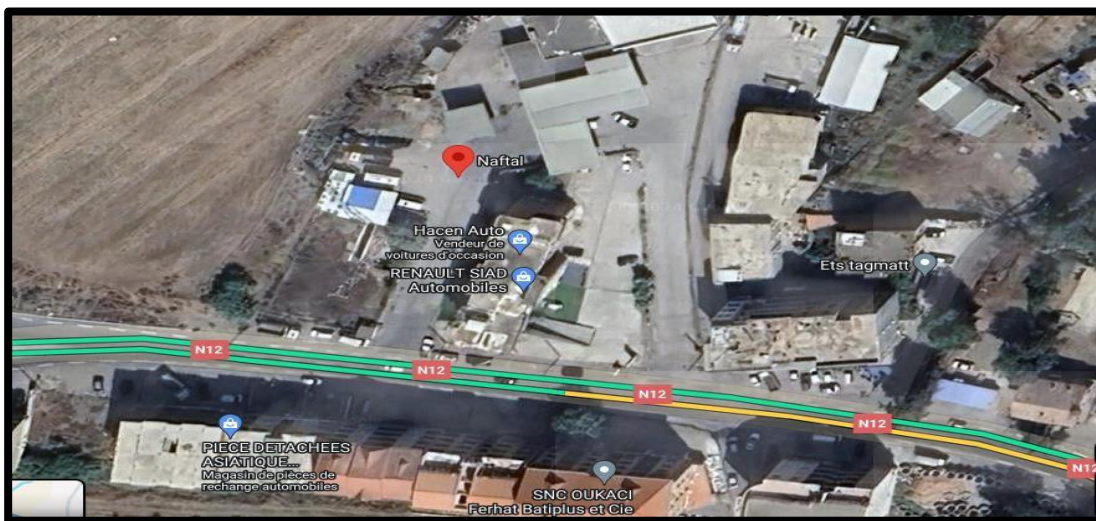


Figure 6 : vue satellitaire de la station-service d'Azazga (Google Maps, 2024).

2.1. Etude des paramètres climatiques

- Climat

Le climat de la région d'Azazga est de type méditerranéen, la pluviométrie est assez élevée mais également répartie durant l'année. Elle fait apparaître l'opposition d'une saison hivernale relativement humide et une saison estivale beaucoup plus sèche. L'humidité est généralement modérée tout au long de l'année, mais elle peut augmenter en hiver.

- **Température**

Le tableau 4 présente les températures moyennes de la région d'Azazga.

Tableau4 : Températures moyennes, mensuelles d'Azazga durant la période2016-2024(<https://fr.weatherspark.com/>).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Température moyenne(C°)	8	9	11	13	16	20	23	24	21	18	13	9

- ✓ La température moyenne à Azazga en 2023 est d'environ17, 5 °C.
- ✓ Les mois les plus chauds sont juillet et août, avec des températures moyennes supérieures à 24°C.
- ✓ Les mois les plus froids sont janvier et décembre, avec des températures moyennes inférieures à 9 °C.

- **Pluviométrie** : le tableau 5 présente la pluviométrie en enregistrée à Azazga. De 2016 à 2024.

Tableau5 : Précipitation moyennes annuelles de la région d'Azazga (2016-2024) (<https://fr.weatherspark.com/>).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
PM (mm)	72.5	63.7	51.2	45.0	31.6	9.5	3.1	7.8	24.6	39.2	65.0	77.2

- ✓ La saison des pluies à Azazga s'étend d'octobre à avril, avec les précipitations les plus importantes en novembre et décembre estimées à 65 et 77.2 mm respectivement.
- ✓ La saison sèche s'étend de mai à septembre, et le mois de juillet est le plus sec en présentant une pluviométrie de l'ordre de3.1 mm.

II. Matériel et Méthodes

1- Matériel

L'étude a été réalisée sur des échantillons de sol provenant de deux stations-services d'Azazga et Freha. Il s'agit des sols contaminés accidentellement par les hydrocarbures (essence et gasoil).

❖ Les principales causes de cette pollution sont :

- ✓ Les accidents de dépotage
- ✓ Points de remplissage

2- Méthode d'échantillonnage

Les échantillons sont prélevés dans les deux stations-services en une seule journée au mois de Février (13/02/2024).

Nous avons entamé notre travail expérimental par le choix de trois points d'échantillonnage selon la distance à la source de pollution. Les prélèvements sont été effectués à une profondeur de 0 à 20 cm dans les trois points (P1, P2, P3).

- Le premier point correspond à un sol pollué (P1) à l'intérieur de la station-service.
- Le deuxième point est un sol peu pollué (P2) un peu loin de la source de pollution (5m).
- Le troisième point loin du milieu de pollution (P3) est loin de la source de la pollution (20m).

Les échantillons de sol ont été acheminés au laboratoire dans des sacs en plastique avec des étiquettes.

3- Traitement et préparation du sol

Au laboratoire, les sols échantillonnés sur le terrain ont été étalés sur les paillasses afin de les sécher à l'air libre. Ensuite, ils sont écrasés manuellement afin de les réduire en particules fines et tamisés à l'aide d'un tamis dont le diamètre des mailles est de 2 mm. Ils sont, par la suite, étiquetés et stockés dans un endroit sec jusqu'à leur analyse. La figure7 représente les différentes étapes de préparation du sol.



Figure7 : Différentes étapes de préparation du sol.

A : les sols échantillonnés à Freha.

B : les sols échantillonnés à Azazga.

C : Tamisage des échantillons.

D : Stockage des échantillons dans un endroit sec.

III. Analyses physico-chimiques des échantillons

Les analyses ont été réalisées au niveau de laboratoire de pédologie du département d'Agronomie, le laboratoire commun, le laboratoire de chimie pharmaceutique de l'université Mouloud Mammeri ainsi que laboratoire de pédologie de l'institut national de la recherche forestière (INRF) de Bâinem.

1- Mesure du pH

Le pH a été déterminé dans une suspension sol/eau distillée selon un rapport volumique de 2/5.

Nous avons pesé 20 g de sol dans un bécher de 100ml et nous lui avons ajouté 50 ml d'eau distillée puis remuer la suspension pendant quelques minutes (3 à 4) avec un agitateur et laisser la reposer pendant 15 minutes. Ensuite, plonger l'électrode du pH-mètre dans le liquide pour prendre la valeur du pH, après la stabilisation de l'aiguille de l'appareil (Figures 8).



Figure8 : pH-mètre.

2- Détermination de la conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique d'une solution du sol est un indice de sa teneur en sels solubles. Pour déterminer la CE du sol, nous avons pesé 20g de sol dans un bécher de 250ml et lui avons ajouté 100ml de l'eau distillée puis, la solution est portée sur un agitateur pendant 2min. Laissez le mélange au repos pendant 30min. Ensuite, filtrer et refiltrer pour avoir un filtrant clair auquel on a ajouté 2 gouttes d'hexamétaphosphate de sodium à 0,1%.

La conductivité électrique est mesurée à l'aide d'un conductimètre, lire les valeurs après la stabilisation de l'aiguille (figure 9).



Figure9 : mesure de la CE.

3- Calcaire total

Le dosage du calcaire total se fait par attaque du carbonate de calcium par l'acide chlorhydrique selon la réaction suivante :



Deux méthodes sont généralement utilisées :

- La méthode gazométrique, on mesure du CO_2 dégagé.
- La méthode volumétrique, consiste à titrer l'excès d'acide chlorhydrique par la soude.

Dans la présente étude, nous avons adopté la méthode volumétrique. Nous avons pesé 1g de terre dans un bécher de 250 ml et nous lui avons ajouté 20 ml d'acide chlorhydrique (1N) et 100 ml de l'eau distillée. Nous avons porté le bêcheur sur le bain de sable à 60°C en agitant de temps à autre et laisser bouillir pendant quelques minutes.

Après refroidissement, nous avons filtré les contenus des béchers dans une fiole de 250 ml tout en lavant bien la terre. Ensuite, nous avons ajusté à 250 ml d'eau distillée, puis nous avons prélevé 100 ml du filtrat et porter dans un bêcheur de 400 ml en y ajoutant 3 gouttes de phénophtaléine à 2% et titrer le reste d'acide chlorhydrique par la soude (1N) jusqu'au virage vers le rouge violacé.

4- Carbone organique

On détermine le carbone organique en utilisant la méthode ANNE (méthode à chaud). Cette méthode implique l'oxydation du carbone à l'aide d'une solution de bichromate de potassium (10 ml) dans un milieu sulfurique (15 ml), puis la quantité de bichromate non réagie est dosée à l'aide du sulfate ferreux (sel de Mohr). Ce dosage, en retour, permet de calculer la quantité de bichromate qui a été neutralisé par le carbone organique.

Nous avons pesé et placé 0,5g de sol dans un ballon et lui a nous versé 15ml de bichromate de potassium et 20ml d'acide sulfurique puis poser le ballon sur un bain de sable jusqu'à l'ébullition. Dès la première goutte condensée, nous relevons le ballon du bain de sable et nous le laissons refroidir. Ensuite, nous plaçons le mélange dans une fiole jaugée de 250ml, auquel nous avons rajouté de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et mélanger. Puis nous avons mis 20ml du mélange, à l'aide d'une pipette de 20ml, dans un erlenmeyer au quel nous avons ajouté 200ml d'eau distillée, une pincée de fluorure de sodium et 4 gouttes de diphénylamine puis nous avons effectué le titrage par une solution de sel de Mohr jusqu'à l'obtention d'une couleur bleu vert.

Le taux de carbone organique est donné par la formule suivante :

$$C \% = \frac{(Vt - Ve) * 0.615 * 10 * 100}{P}$$

Vt : volume titré de la solution de sel de Mohr de l'échantillon témoin

Ve : volume titré de la solution de sel de Mohr de l'échantillon

P : Poids du sol en mg.

5- Matière organique

Le dosage de la matière organique est réalisé à partir du dosage de carbone organique, car le C.O est estimé à 58% de la M.O (Clément et Pielain, 2003).

La matière organique est calculée à partir de la formule suivante :

$$\%M.O = \%C * 1,724.$$

6- Dosage des anions (les sels solubles)

Le mécanisme de dosage repose sur la neutralisation d'un volume de solution par l'acide minéral atténué en présence d'indicateurs colorés.

• Les carbonates et les bicarbonates

Les carbonates et les bicarbonates sont dosés sur la même aliquote. Ainsi, à partir de la solution dans laquelle nous avons dosé les carbonates, nous les neutralisons par une solution acide (acide sulfurique) jusqu'à ce que tous les bicarbonates soient neutralisés (Clément et Pielain, 2003).

Mode Opérateur

- Nous prélevons 10 ml de l'extrait du sol, on ajoute 3 à 5 gouttes de phénolphtaléine à 2 % (Figure 10).
Si l'extrait reste incolore, il y a l'absence des carbonates. Si la couleur rose apparaît, cela indique la présence des carbonates, on va la titrer doucement avec l'acide sulfurique (H₂SO₄) à 0,1N jusqu'à ce que la couleur rose disparaisse.
- Noter le volume V1 et ne pas remettre la burette à zéro.
- Après on ajoute 6 goutte de méthyle orange (C₁₄H₁₄N₃NaO₃S) et le titrer par l'acide sulfurique (H₂SO₄) jusqu'au virage du jaune orangé au rouge (Figure 11).
- Noter le volume V2 d'acide utilisé.

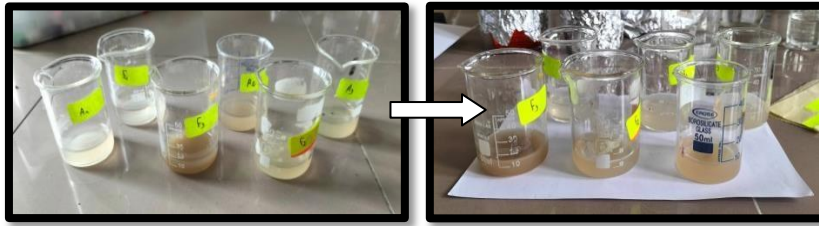


Figure10 : Titration des Carbonates.

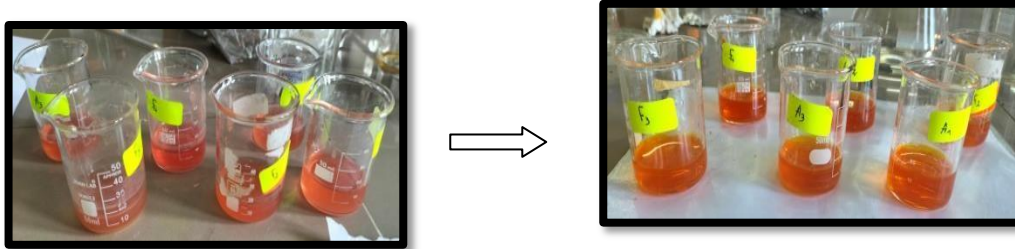


Figure11 : Titration des Bicarbonates.

- **Les chlorures**

Les chlorures sont déterminés par l'argentimétrie suivant la méthode de Mohr : précipite les chlorures par les nitrates d'argent en présence des chromates de potassium (Figure 12).

Mode Opérateur

- Nous plaçons 10 ml de l'extrait du sol dans un bécher de 50 ml, puis nous ajoutons 10 gouttes de solution de bichromate de potassium (K_2CrO_4).
- Doser avec la solution de nitrate d'argent ($AgNO_3$) à 0,01N, en agitant continuellement la solution jusqu'à ce qu'une couleur rouge orange se développe.
- Noter le volume V de nitrate d'argent utilisé.

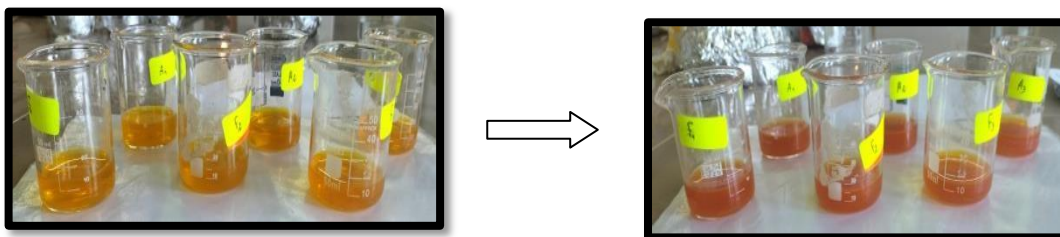


Figure12 : Titration des chlorures.

7- Humidité hygroscopique du sol

Pour mesurer l'humidité de nos sols, nous avons pesé 5g du sol dans des capsules, puis les avons placés à l'étuve à une température de 105°C pendant 24 heures. Ensuite, les capsules sont retirées et placées dans un dessiccateur puis repeser les capsules. Le taux de l'humidité s'exprime en % selon la formule suivant :

$$\text{Humidité \%} = \frac{P1 - P2}{P2} * 100$$

P1 : Le poids de sol (g) avant le séchage.

P2 : Le poids de sol (g) après le séchage à 105°C.

8- Granulométrie

La méthode internationale d'analyse granulométrique consiste à disperser les argiles à l'aide de l'hexamétaphosphate de sodium. Par la suite, nous recueillons les argiles et les limons fins à l'aide de la pipette de Robinson, tandis que les limons grossiers et les sables grossiers sont prélevés par tamisage. On a pu quantifier ces éléments du sol en pourcentage, et la texture finale est obtenue grâce au triangle des textures (Figure13) dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages des éléments du sol calculés.

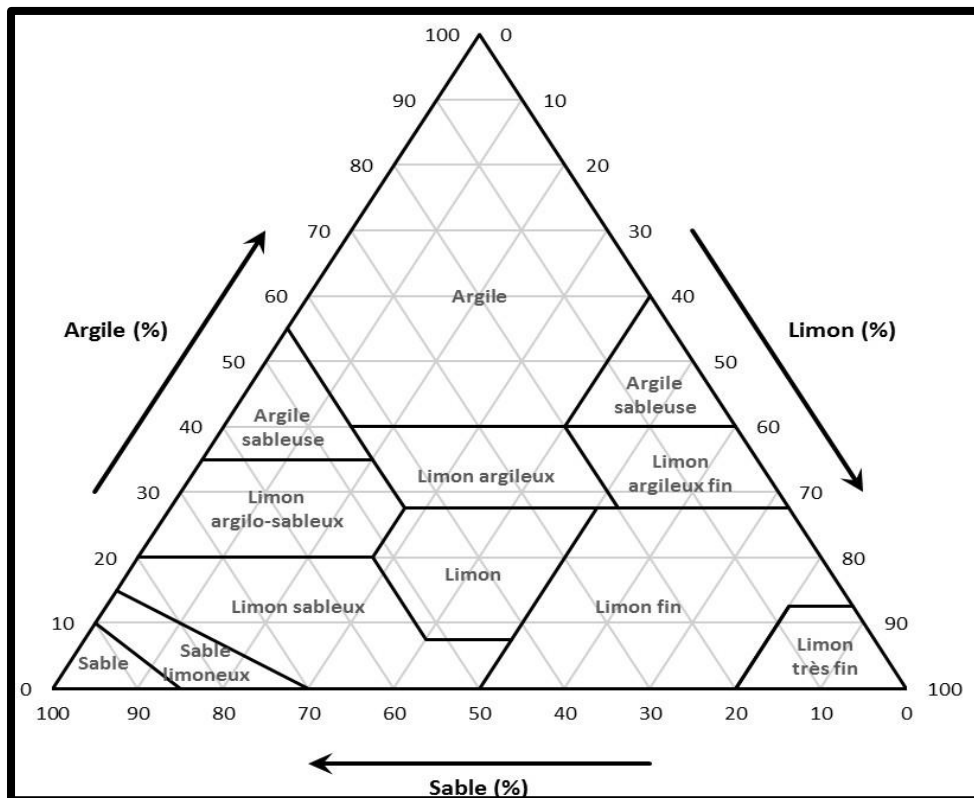


Figure13 : Triangle des textures de l'U.S.D.A.(1986).

L'analyse granulométrique par la pipette de Robinson est une méthode classique utilisée pour déterminer la distribution des tailles de particules dans les sols et les sédiments. Elle repose sur le principe de sédimentation des particules en suspension dans un liquide, selon la loi de Stokes : elle décrit la vitesse de chute de petites particules sphériques en suspension indépendante dans un fluide sous l'action de la gravité. Elle se fait en plusieurs étapes:

1- Attaque à froid : pour la destruction de la matière organique et des carbonates.

- Nous avons pesé 20 g de terre que nous avons placés dans un bécher de 600 ml de forme haute.
- Nous avons mouillé l'échantillon par un jet de pissette d'eau distillée, puis nous avons ajouté 50 ml d'eau oxygénée (H_2O_2) à 20 volumes et nous avons laissé reposer le mélange une nuit.

2- Attaque à chaud

- Ajouter 10 ml d'eau oxygénée avant l'attaque.
- Porter le bécher au bain de sable ; agiter fréquemment le bécher pour faire descendre la mousse, jeter des jets d'eau distillée autour de la paroi du bécher pour descendre la mousse et ne pas laisser l'échantillon aller au sec (Figure 14).
- Ajouter de temps en temps 10 ml d' H_2O_2 pour s'assurer que l'échantillon n'est plus humifère.
- Ne jamais laisser l'échantillon aller à l'état sec.
- La réaction est terminée quand la mousse disparaît, après laisser refroidir.

3- Dispersion chimique/mécanique, sédimentation

- Transvaser le sol dans un flacon d'agitation, bien rincer le bécher.
- Ajouter 40 ml de la solution dispersante d'hexamétaphosphate de sodium et 1 ml d'ammoniaque pur. Agiter pendant 4 heures à l'agitateur rotatif.
- Transvaser la suspension dans une éprouvette de 1000 ml et compléter au volume avec l'eau distillée (Figure 15).
- Prévoir une éprouvette de 1000 ml contenant 40 ml d'hexamétaphosphate de sodium et compléter au volume avec l'eau distillée (le témoin).

4- Les prélèvements

- Placer un thermomètre dans le témoin.
- Assurer une remise en suspension totale des particules par une agitation à l'aide d'une tige de verre, faire partir le chronomètre et noter le temps.
- Prélever à l'aide de la pipette Robinson les particules du sol (argile, limon et sable) après le temps de sédimentation nécessaire et à la profondeur retenue.



Figure14 : les bécans dans le bain de sable.



Figure15 : les suspensions dans les éprouvettes.

IV. Analyse statistique

Le traitement des résultats obtenus a été réalisé avec le logiciel statistique et le logiciel R. Les résultats sont soumis à une analyse de la variance à un critère de classification : le degré de pollution du sol. Lorsque les différences sont significatives, nous avons appliqué le test de Newman et Keuls pour déterminer les groupes homogènes. En outre, nous avons réalisé une ACP et une matrice de corrélation afin d'étudier la relation qui existe entre le gradient de pollution et les paramètres physico-chimiques des sols et d'en tirer un modèle.

Résultats et Discussion

Dans le but de caractériser l'effet des hydrocarbures sur les propriétés du sol, nous avons effectué des analyses physico-chimiques sur des prélèvements du sol de deux stations-services des régions de Freha et Azazga.

III. Résultats des analyses physico-chimiques des sols prélevés dans les deux stations d'études Azazga et Freha

III.1. Paramètres chimiques

III.1.1. Potentiel hydrogène (pH)

- ✓ Les résultats de la détermination du pH pour les sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 16. L'analyse des résultats obtenus montre que le pH des sols diminue suivant le gradient de la pollution.
- ✓ Les sols pollués (SP1) représentent les valeurs les plus importantes de pH qui sont de 7,7 à Freha et 7,65 à Azazga. Le pH, diminue légèrement dans les sols peu pollués (SP2) avec 7,5 à Freha et 7,29 à Azazga et il atteint une valeur minimale de 7 à Freha et 6,67 à Azazga dans les sols les plus éloignés de la source de pollution (SP3).

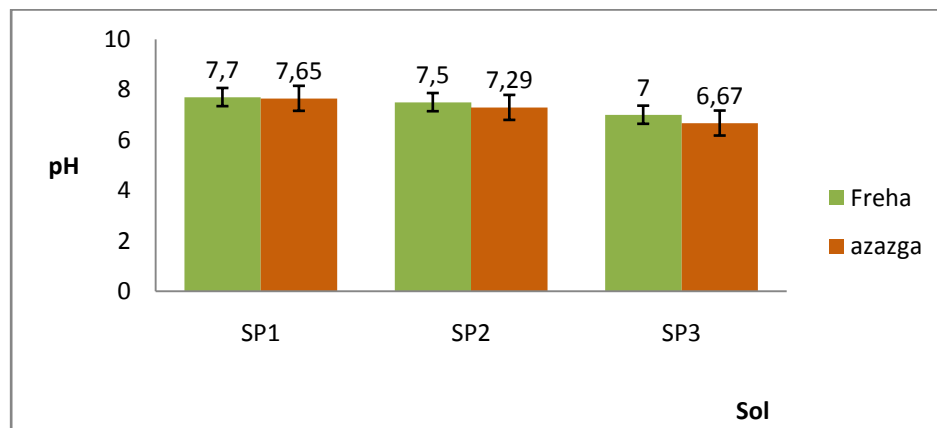


Figure 16 : Valeurs de pH des sols des deux stations.

Selon les normes de **Baize, 1989** (annexes N°I), les valeurs enregistrées dans la présente étude indiquent que :

- Les sols pollués pour les deux stations sont des sols légèrement alcalins
- Les sols peu pollués présentent un pH neutre à la station d'Azazga et légèrement alcalin à Freha
- Les sols les plus éloignés de la source de pollution sont faiblement acides à la station d'Azazga et neutres à Freha.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre

les valeurs de pH mesurées dans les deux stations étudiées ($p_value = 0.6107$) et entre les points de prélèvements.

III.1.2. Conductivité électrique

Les résultats de la détermination de la conductivité électrique des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 17.

Nous remarquons une diminution du taux de la CE dans les deux stations-services. Les sols pollués(SP1) présentent les valeurs les plus importantes de la conductivité électrique qui sont de 0,35ms/cm à Azazga et de 0,3ms/cm à Freha. La CE, diminue légèrement dans le sol peu polluée(SP2) avec 0,25ms/cm à Azazga et de 0,15ms/cm à Freha et elle atteint une valeur minimale de 0,2ms/cm à Azazga et de 0,1 ms/cm à Freha dans le sol le plus éloigné de la source de pollution(SP3).

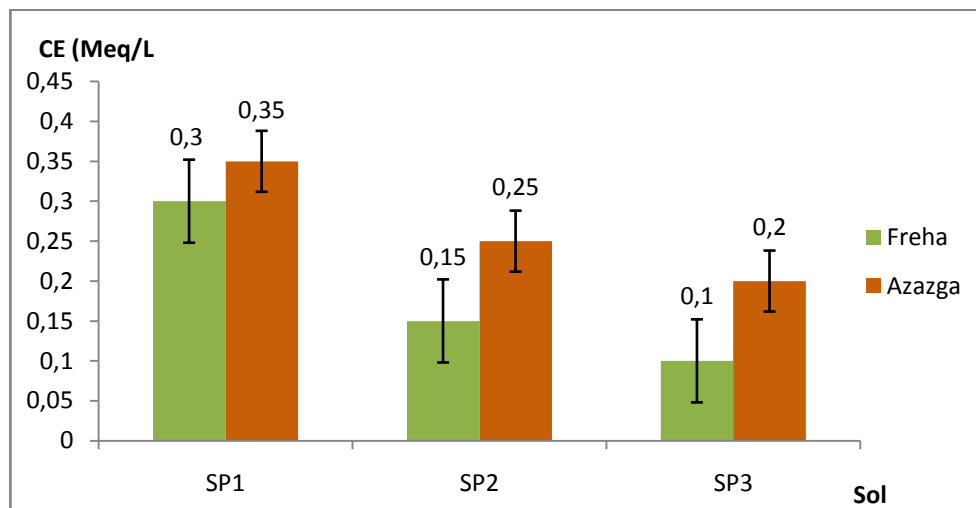


Figure17 : Valeurs de la CE des sols des deux stations.

Selon les résultats d'analyse et les normes de la conductivité électrique de **Baize, (2000)** (Annexe N°I), tous les sols des deux stations-service sont non salés.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a une différence significative entre les concentrations de CE mesurées dans les deux stations étudiées ($p_value = 0.3314$) et entre les points de prélèvements.

III.1.3. Calcaire total

Les résultats de la détermination du taux de calcaire total des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 18.

Nous remarquons une diminution la teneur en calcaire total dans les deux stations de services. Les sols pollués (SP1) présentent les valeurs les plus importantes de calcaire total qui sont de

9,12% à Freha et 5,76% à Azazga. Pour les sols peu pollués (SP2) les résultats de calcaire total sont constants dans les deux stations à une valeur de 3.84 %. Dans les sols les plus éloignés de la source de pollution, le taux de calcaire diminue jusqu'à atteindre une valeur minimale de 0.96% à Freha et 0 % à Azazga.

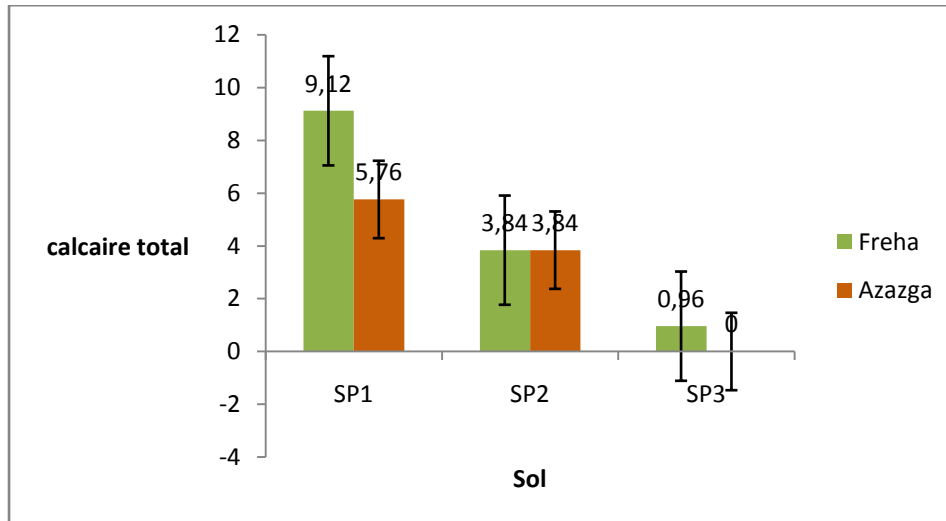


Figure18 : Taux de calcaire total des sols des deux stations.

Selon **GEPPA, (1981)** (annexe N°I) et les résultats obtenus, les sols pollués (SP1) sont des sols modérément calcaires dans les deux stations.

Les sols peu pollués (SP2) sont des sols peu calcaires dans les deux stations.

Les sols les plus éloignés de la source de pollution (SP3) sont non calcaires dans les deux stations.

Cependant, d'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre les concentrations moyennes du calcaire dans les deux stations étudiées ($p_value = 0.6513$).

III.1.4. Carbone organique

Les résultats de la détermination du taux de carbone organique des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 19.

Les résultats obtenus montrent que les valeurs du carbone dans les deux stations sont élevées dans les sols pollués (SP1) atteignant des taux de 4,55 % à Azazga et 2,52 % à Freha. Le taux de carbone diminue dans les sols peu pollués (SP2) avec 2,89 et 2,21 % à Azazga et Freha respectivement. Dans les sols les plus éloignés de la source de pollution, le taux de carbone diminue encore plus pour atteindre une valeur de 1,01 % à Freha et 2,21 % à Azazga.

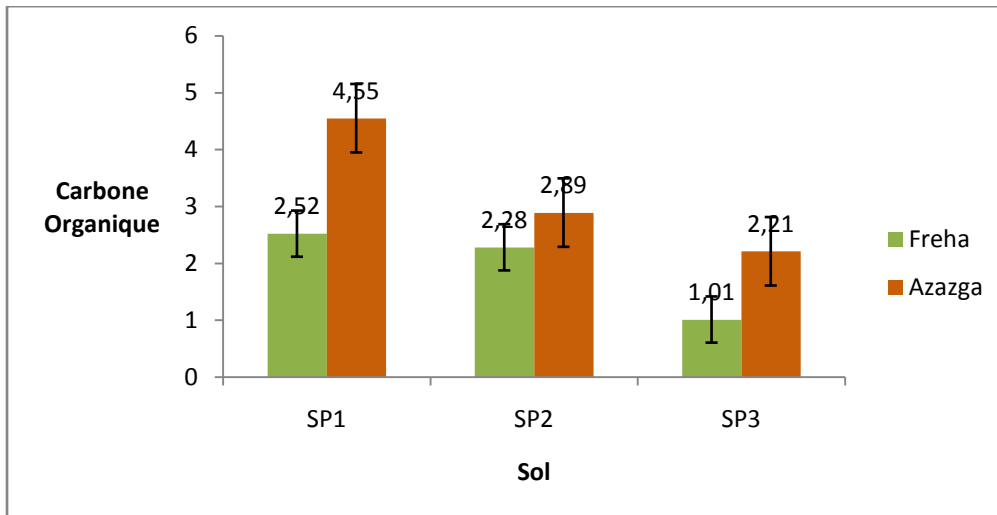


Figure19 : Taux de carbone organique des sols des deux stations.

Godwin et al. (2013) (annexe N°I), attestent que le taux de carbone augmente dans les sols pollués. Nos résultats montrent que le taux de carbone organique est plus élevé dans les sols pollués (SP1) par rapport aux sols les plus éloignés de la source de pollution (SP3).

Cependant, les résultats du test de Kruskal-Wallis ont révélé que la différence observée n'est pas significative ($p_value = 0.2112$).

III.1.5. Matière organique

Les résultats de la détermination de la teneur en matière organique des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 20.

Selon la figure 20 nous remarquons que le taux de matière organique augmente suivant le gradient de pollution. Elle présente les mêmes fluctuations que le carbone. Les valeurs élevées sont enregistrées dans les sols pollués (SP1) dans les deux stations. Les valeurs minimales sont de 1,75 et 3,81 % enregistrées au niveau des sols loin de la source de la pollution (SP3) respectivement à Freha et à Azazga.

Il y a une plus grande quantité de matière organique dans les sols pollués que dans les sols non pollués. On calcule le taux de matière organique en fonction du taux de carbone organique.

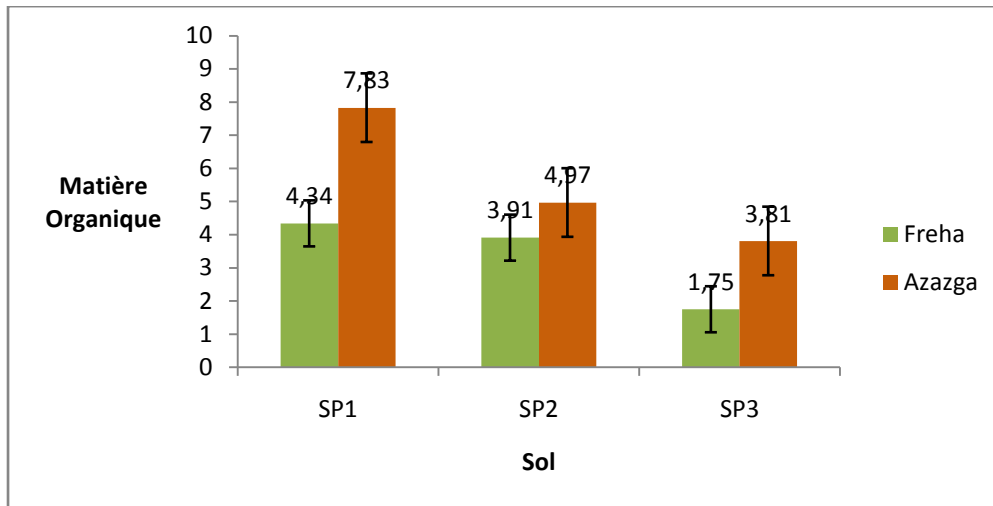


Figure20 : Taux de matière organique des sols des deux stations-services.

D'après **Hazelton et Murphy (2007)** (annexe N°I), les conclusions obtenues montrent que les sols pollués (SP1) et les sols peu pollués (SP2) reforment une grande quantité de matière organique.

Le sol éloigné de la source de pollution (SP3) d'Azazga présente un taux très élevé de matière organique, tandis que celui de Freha présente un taux modéré à modérément élevé.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre les concentrations de matière organique mesurées dans les deux stations étudiées ($p_value = 0.2103$).

III.1.6. Les sels solubles

➤ Les carbonates

Les résultats de dosage des carbonates des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 21. Nous remarquons que le taux des carbonates est variable.

Pour la station d'Azazga, le premier échantillon (sol pollué) présente le taux le plus élevé estimé à 166 méq/l, le deuxième et le troisième échantillon présentent des taux respectifs de 84 et de 140 méq/l.

Pour la station de Freha, le deuxième échantillon (sol peu pollué) présente le taux le plus élevé en carbonates de l'ordre de 92 méq/l. Le premier et les troisièmes échantillons présentent des taux respectifs de 24 et 56 méq/l.

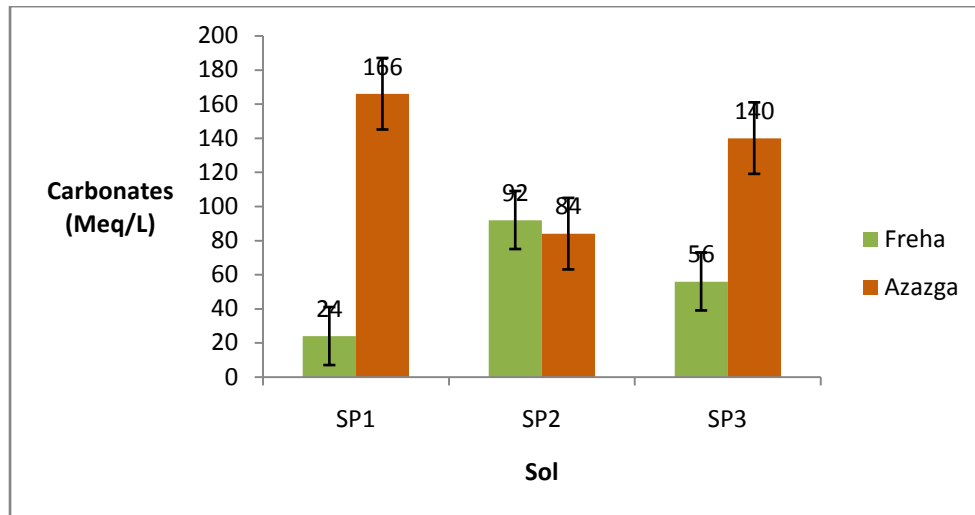


Figure21 : Taux des carbonates des sols des deux stations.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas une différence significative entre les concentrations des carbonates mesurées dans les deux stations étudiées ($p_value = 0.08286$).

➤ Les bicarbonates

Les résultats de dosage des bicarbonates des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 22. Nous remarquons que le taux des bicarbonates est variable.

Pour la station d'Azazga, le troisième échantillon (sol non pollué) présente le taux le plus élevée de l'ordre de 160 méq/l, le premier et le deuxième échantillon présentent des taux respectifs de 66 et 144 méq/l.

Pour la station de Freha, le deuxième échantillon (sol peu pollué) présente le taux le plus élevé d'une valeur de 172 méq/l. Le premier échantillon (le sol pollué) et le troisième échantillon présentent des taux respectifs de 142 méq/l et 80 méq/l.

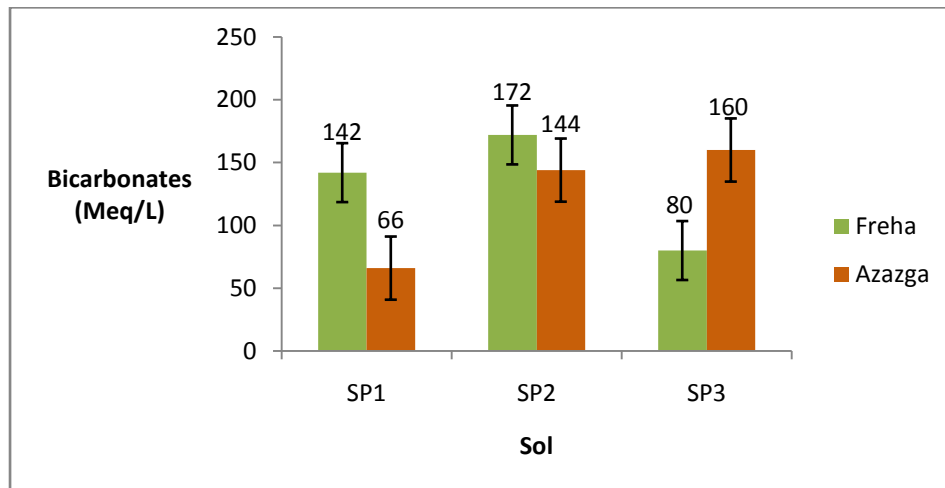


Figure22 : Taux des bicarbonates des sols étudiés dans les deux stations Freha et Azazga.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre les concentrations des bicarbonates mesurées dans les deux stations étudiées ($p_value = 0.8502$).

➤ Les chlorures

Les résultats de dosage des chlorures des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 23. Nous remarquons une augmentation de la teneur en chlorures dans les deux stations-services.

Les relevés du sol pollué présentent une valeur minimale en chlorures qui est de 4 méq/l à Azazga et de 7 méq/l à Freha, puis elle augmente légèrement dans le sol peu pollué avec 9 méq/l à Azazga et de 11 méq/l à Freha et atteint une valeur importante dans les sols les plus éloignés de la source de pollution estimée à 13 méq/l à Azazga et 15 méq/l à Freha.

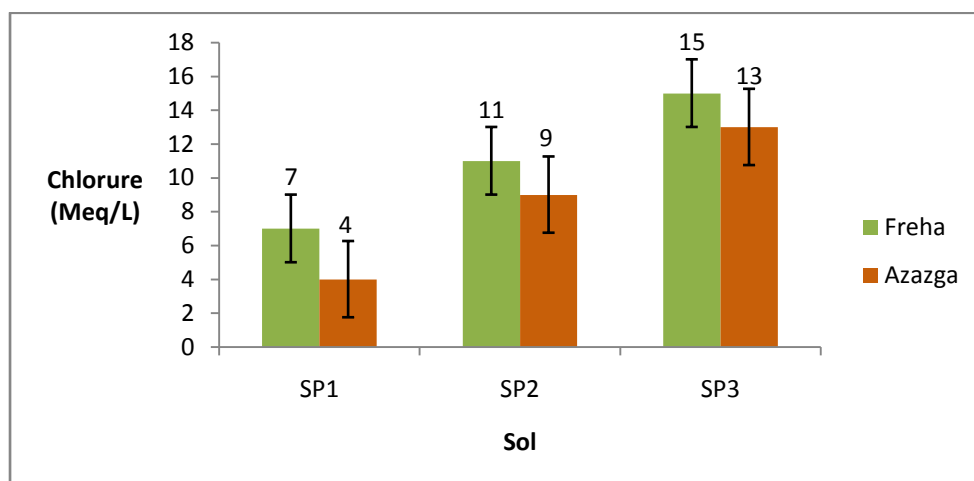


Figure23 : Taux des chlorures des sols des deux stations.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre les concentrations en chlorures de s s o l s des deux stations étudiées ($p_value = 0.5398$).

III.2. Paramètres physiques

III.2.1. Humidité

Les résultats de la détermination de l'humidité des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 24. Nous remarquons que le taux d'humidité est variable.

Pour la station de Freha, le deuxième échantillon (sol peu pollué) présente le taux le plus élevé d'une valeur de 0,5742%. Le premier et le troisième échantillon présentent des taux respectifs de 0,4440 et 0,1230%.

Pour la station d'Azazga, le premier échantillon (sol pollué) présente la teneur la plus élevée avec une valeur de 0,3875%, le troisième et le deuxième échantillon présentent des taux respectifs de 0,2659 et 0,1078%.

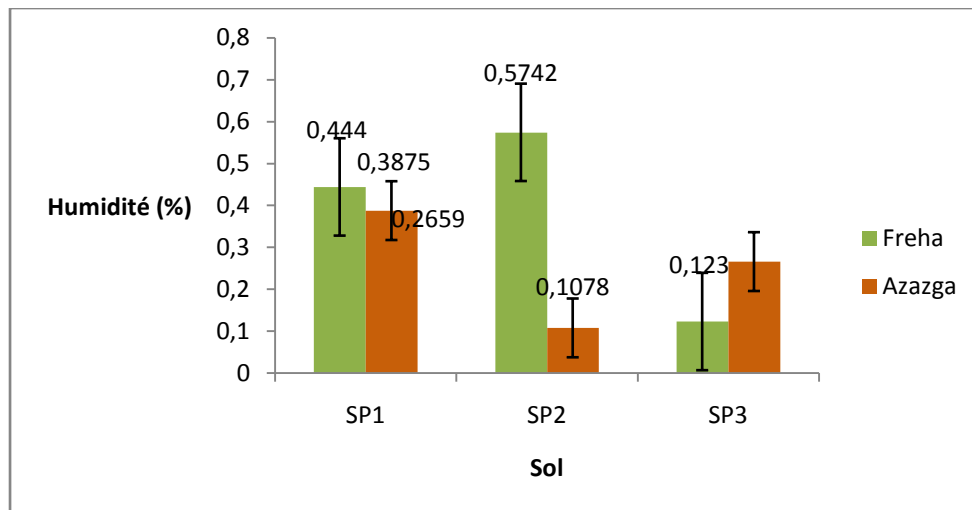


Figure24 : Taux d'humidité des sols des deux stations.

D'après **Fccendini (1995)**, la présence d'un taux élevé d'humidité joue un rôle crucial dans la solubilisation de divers polluants. La forte présence d'humidité dans les sols pollués est due à la faible capacité de ce sol à se perméabiliser (**Guy, 1978**).

Selon **Degrangeset al. (1977)**, l'augmentation du taux d'humidité est due à la pollution par les hydrocarbures qui entravent l'évaporation de l'eau. Selon ces auteurs, les terres contaminées par les hydrocarbures présentent une humidité plus élevée que les parcelles non contaminées.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre

les moyennes d'humidité mesurées dans les deux stations étudiées ($p_value = 0.4731$).

III.2.2. Granulométrie

✧ La station-service Azazga

Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons prélevés dans la station Azazga sont illustrés par la figure 25.

Nous remarquons que les taux moyens en argile, limon et sable sont variables dans les trois points de prélèvement. Dans le sol loin de la source de la pollution (SP3), les taux en limons grossiers sont élevés par rapport aux autres sols (SP1 et SP2) avec une valeur de 62%.

Dans le sol peu pollué (SP2), le taux de sables grossiers est élevé par rapport aux autres sols (SP1 et SP3) avec une valeur de 37%. Les taux en argile dans SP1 sont plus élevés (1%) que dans SP2 et SP3 dont le taux est nul (0%).

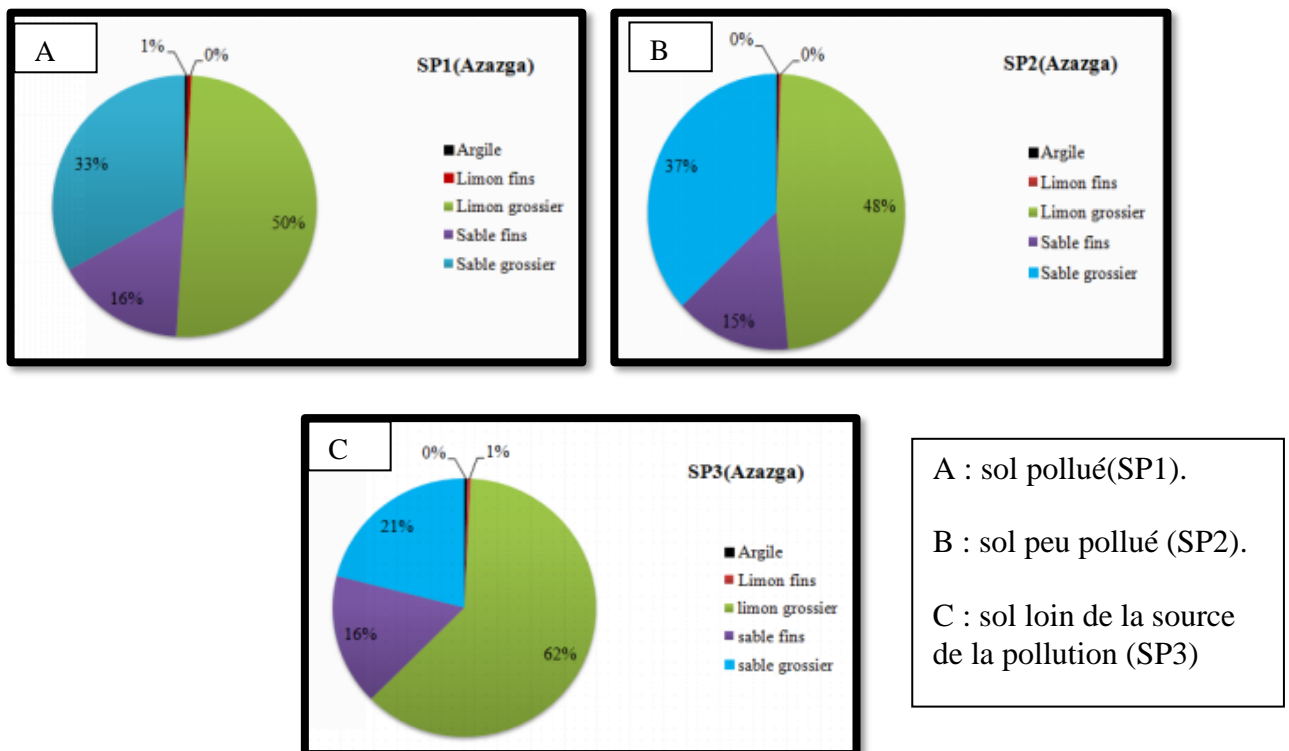
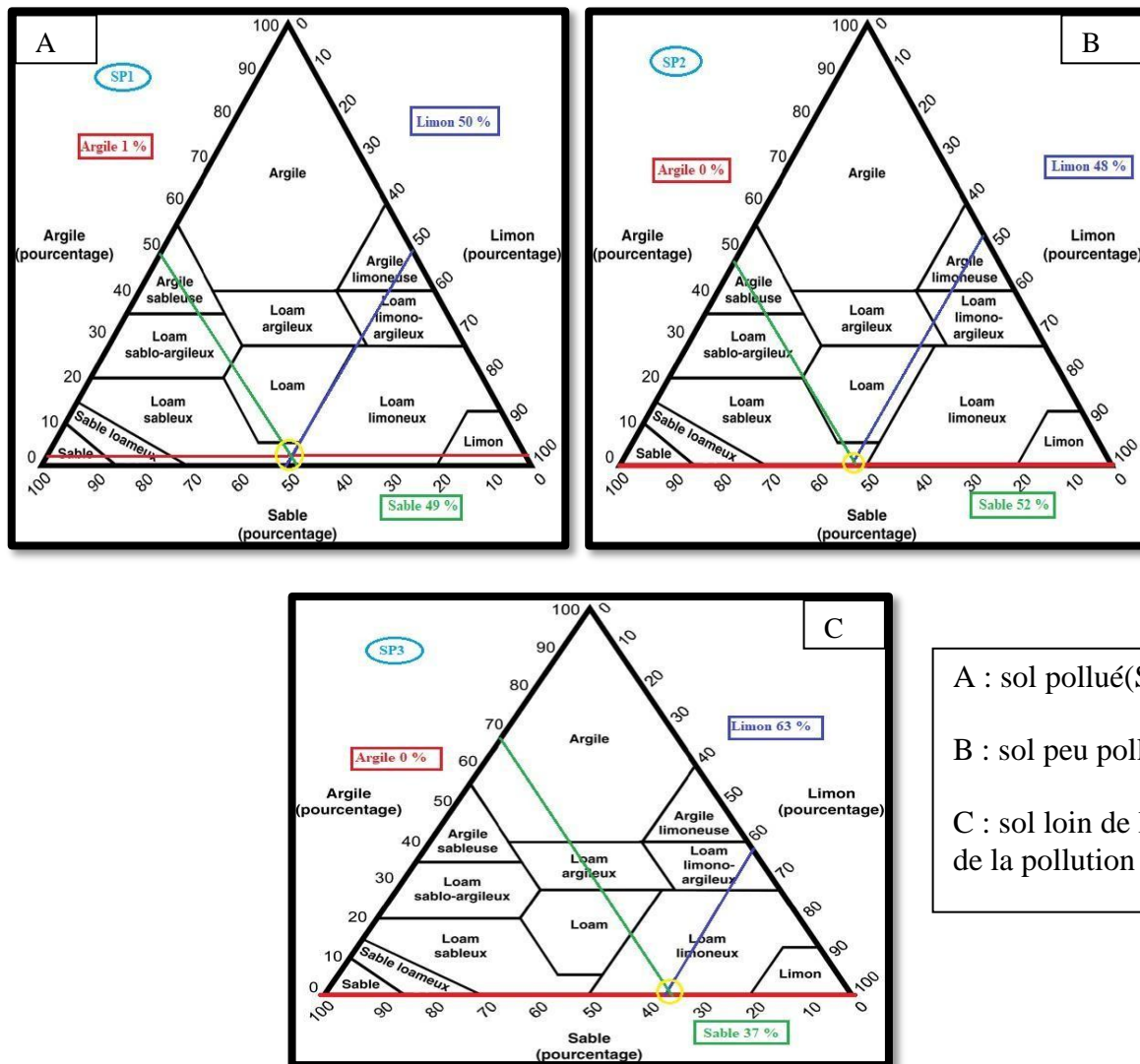


Figure 25 : Composition granulométrique des sols étudiés d'Azazga.

D'après les résultats obtenus, la projection des taux de limon, sable et argile des différents sols, échantillonnés à Azazga, sur le triangle de texture USDA (Figure 26), révèle que les sols pollués (SP1) et peu pollués (SP2) ont une texture limono-sableuse. Pour le sol le plus éloigné de la source de pollution (SP3), nous avons obtenu une texture limoneuse.



A : sol pollué(SP1).
 B : sol peu pollué (SP2).
 C : sol loin de la source de la pollution (SP3)

Figure26 : Résultats de la projection de la composition granulométrique des sols de la station-service d’Azazga sur le triangle de texture de l’USDA (1986).

✧ La station-service de Freha

Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons prélevés dans la station de Freha sont illustrés par la figure 27.

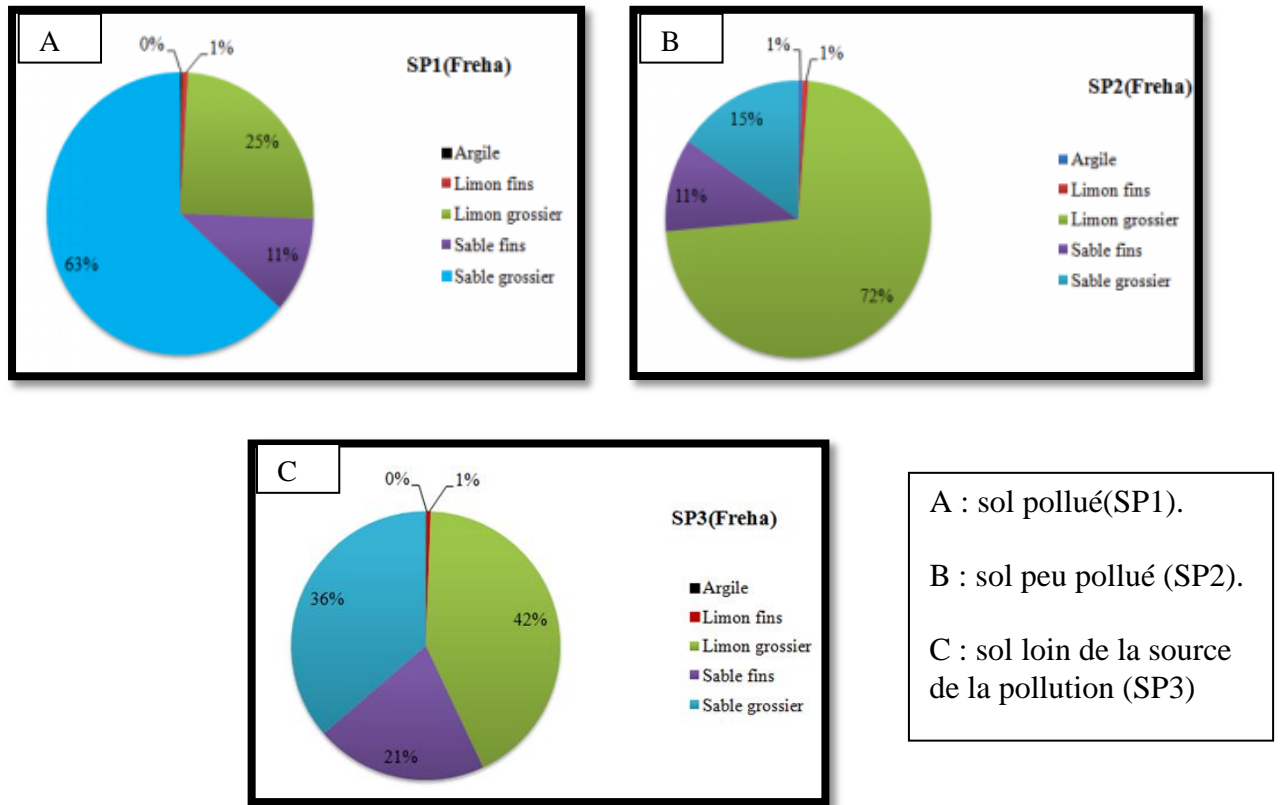
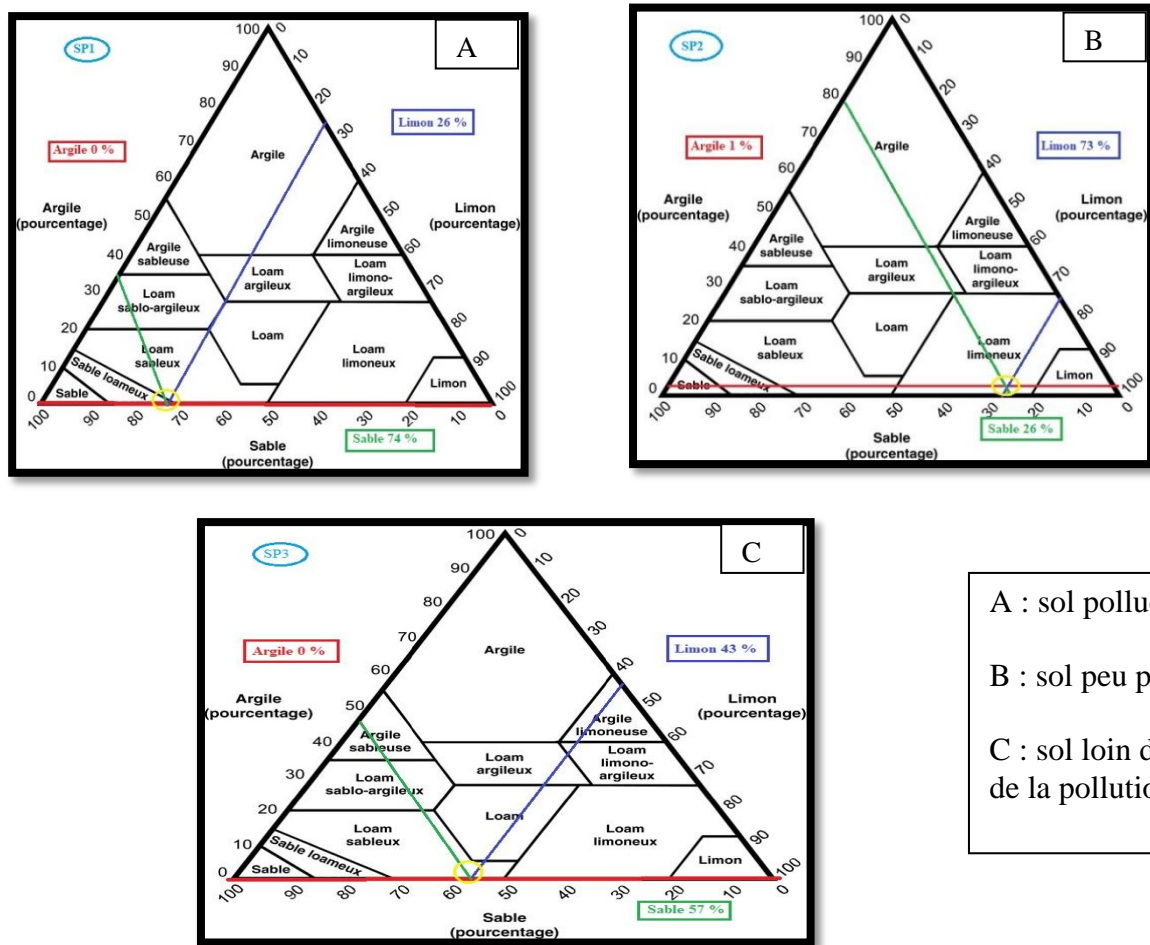


Figure 27 : Composition granulométrique des sols de la station-service de Freha.

Nous remarquons que les taux moyens en argile, limon et sable sont variables dans les trois points de prélèvement. Dans le sol peu pollué (SP2) les taux en limons grossiers sont élevés par rapport aux autres sols (SP1 et SP3) avec une valeur de 72%.

Dans le sol pollué (SP1) le taux des sables grossiers est élevé par rapport aux autres sols (SP2 et SP3) avec une valeur de 63%. Les taux en argile dans (SP2) sont plus élevés avec une valeur de 1% par rapport à SP1 et SP3 dont les taux sont nuls.

D'après les résultats obtenus de la projection des taux de limons, d'argiles et de sables des sols prélevés à la station-service de Freha sur le triangle de texture USDA (Figure 28),



A : sol pollué(SP1).
 B : sol peu pollué (SP2).
 C : sol loin de la source de la pollution (SP3)

Figure 28 : Résultats de la projection de la composition des sols de la station-service de Freha sur le triangle de texture de l’USDA (1986).

Le sol peu pollué (SP2) et le sol le plus éloigné de la source de pollution (SP3) ont une texture limoneuse. Pour le sol pollué (SP1), nous avons obtenu une texture limono-sableuse.

III.3. Analyse en composantes principales (ACP)

Cette analyse a pour objectif d'étudier la relation qui existe entre le gradient de la pollution et les paramètres physico-chimiques des sols étudiés. Les résultats sont illustrés par les figures 29 et 30.

Le graphe (Figure 29) présente l'analyse en composantes principales (ACP) des variables Ca, bic, ph, chl, CE, MO, et car.

Pour l'axe Dim 1 (57, 51 %), les variables calcaires totaux, bicarbonates, pH et chlorure sont corrélées positivement avec cet axe, tandis que les variables conductivité électrique, matière organique et carbonates sont corrélées négativement.

Pour l'axe Dim 2 (21.99 %), les variables calcaires totaux, bicarbonates et pH sont corrélées positivement avec cet axe, tandis que les variables chlorure, conductivité électrique, matière organique et carbonates sont corrélées négativement.

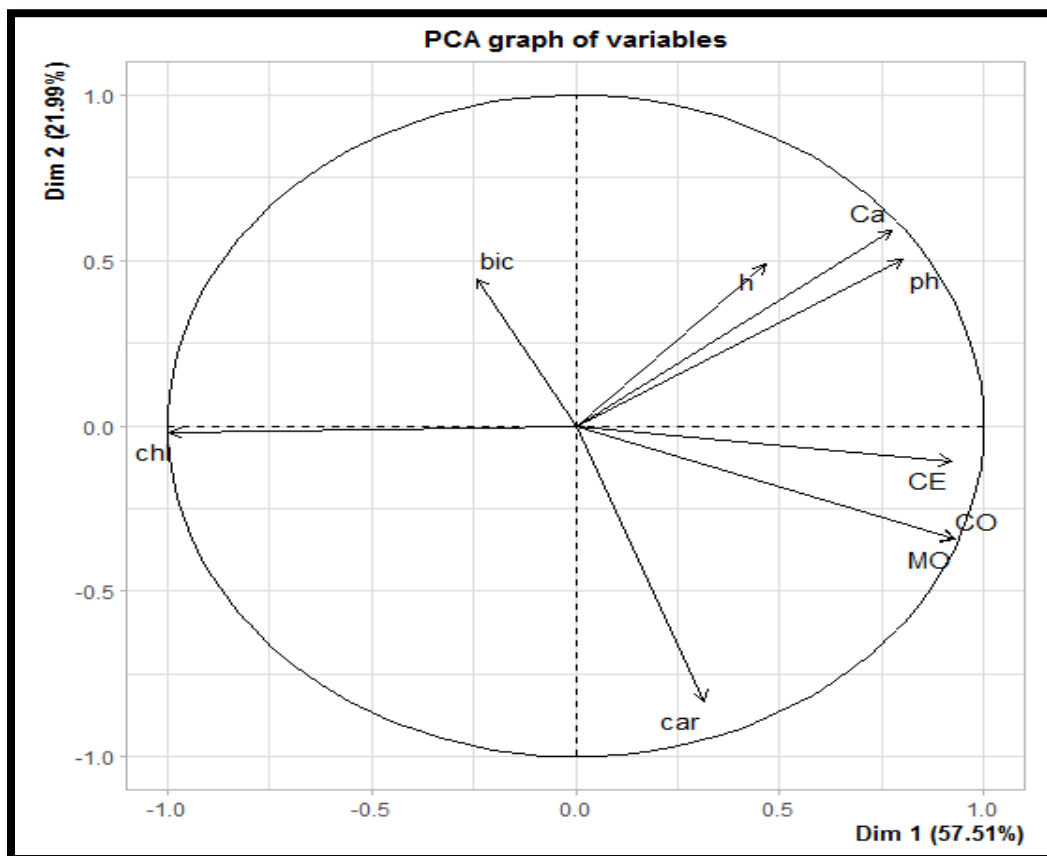


Figure 29 : ACP (variables) pour les paramètres physico-chimiques des sols étudiés.

Le graphe (Figure30) représente la distribution des individus, nous constatons

- Le sol SP3 des deux stations ont la teneur la plus élevée en chlorures ;
- Le sol SP1 des deux stations est la meilleure teneur en matière organique et en carbone organique, en conductivité électrique, en pH, en calcaire total ainsi que le meilleur taux en humidité.
- Le sol SP2 est le plus riche en ce qui concerne les sels solubles (carbonates et bicarbonates).

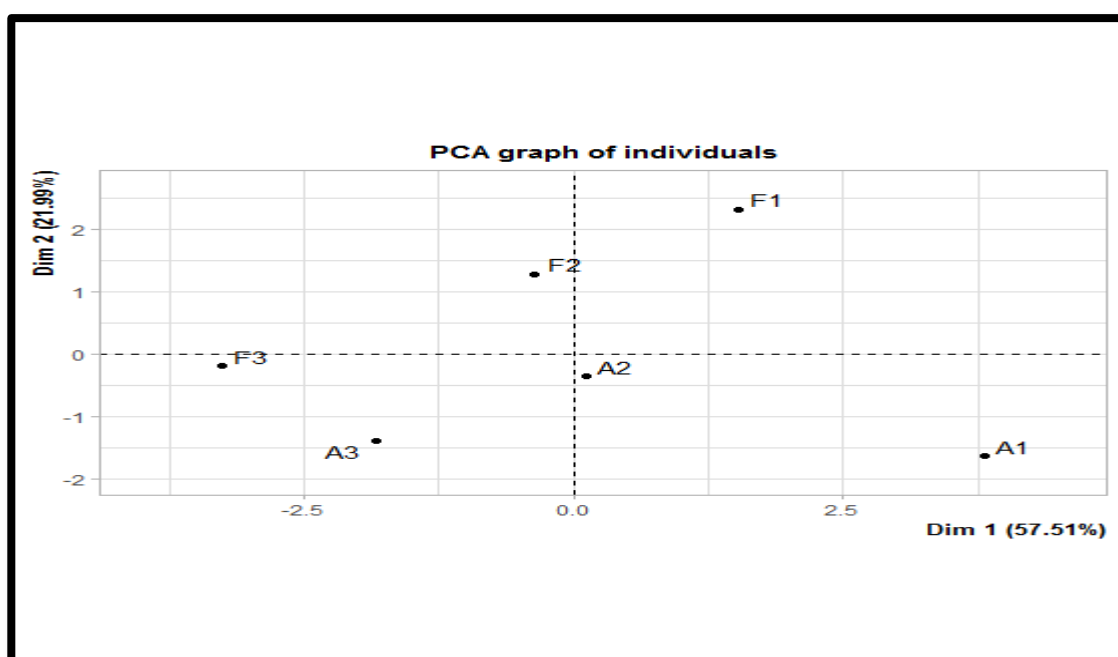


Figure30 : Graphe ACP (Individus) pour les paramètres physico-chimiques des sols étudiés.

IV. Modélisation des paramètres physico-chimiques des sols de deux stations-services

La matrice de corrélation (Tableaux 6) montre les liens entre les différentes variables

Tableau 6 : Matrice de corrélation des propriétés physico-chimiques du sol et la distance à la source de pollution

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	distance	CE	H	Cal	Carb	Bicarb	Chl	pH	MO
distance	1,00000	-0,78246	-0,54404	-0,92168	0,04095	0,05804	0,92231	-0,95076	-0,73164
CE	-0,78246	1,00000	0,22348	0,70676	0,29562	-0,21518	-0,94387	0,59382	0,88469
H	-0,54404	0,22348	1,00000	0,51058	0,05740	0,32265	-0,39262	0,58925	0,29029
Cal	-0,92168	0,70676	0,51058	1,00000	-0,34453	-0,04077	-0,80104	0,91278	0,49261
Carb	0,04095	0,29562	0,05740	-0,34453	1,00000	-0,20915	-0,25265	-0,19601	0,61509
Bicarb	0,05804	-0,21518	0,32265	-0,04077	-0,20915	1,00000	0,24271	-0,15022	-0,27077
Chl	0,92231	-0,94387	-0,39262	-0,80104	-0,25265	0,24271	1,00000	-0,80087	-0,91337
pH	-0,95076	0,59382	0,58925	0,91278	-0,19601	-0,15022	-0,80087	1,00000	0,56077
MO	-0,73164	0,88469	0,29029	0,49261	0,61509	-0,27077	-0,91337	0,56077	1,00000

Lorsque R est proche de **(1)**, il y'a une corrélation positive entre les différentes variables telle que les chlorures et la distance à la source de pollution, la matière organique et la conductivité électrique, le pH et le calcaire .

Lorsque R est proche de **(-1)**, il y'a une corrélation négative entre les différentes variables telle que les chlorures et le pH, le calcaire et la distance à la source de pollution, la matière organique et les chlorures, le pH et la distance à la source de pollution.

Les **figures 31** et **32** représentent les corrélations entre les variables deux à deux.

Dans les régressions, nous remarquons qu'il y a un modèle mathématique qui est sous la forme : $Y = a(x) + b$, où (x) représente la distance et (Y) représente le paramètre.

- Si la p-value < 0,05 cela signifie que la relation est significative.
- Si la p-value > 0,05 cela signifie que la relation n'est pas significative.

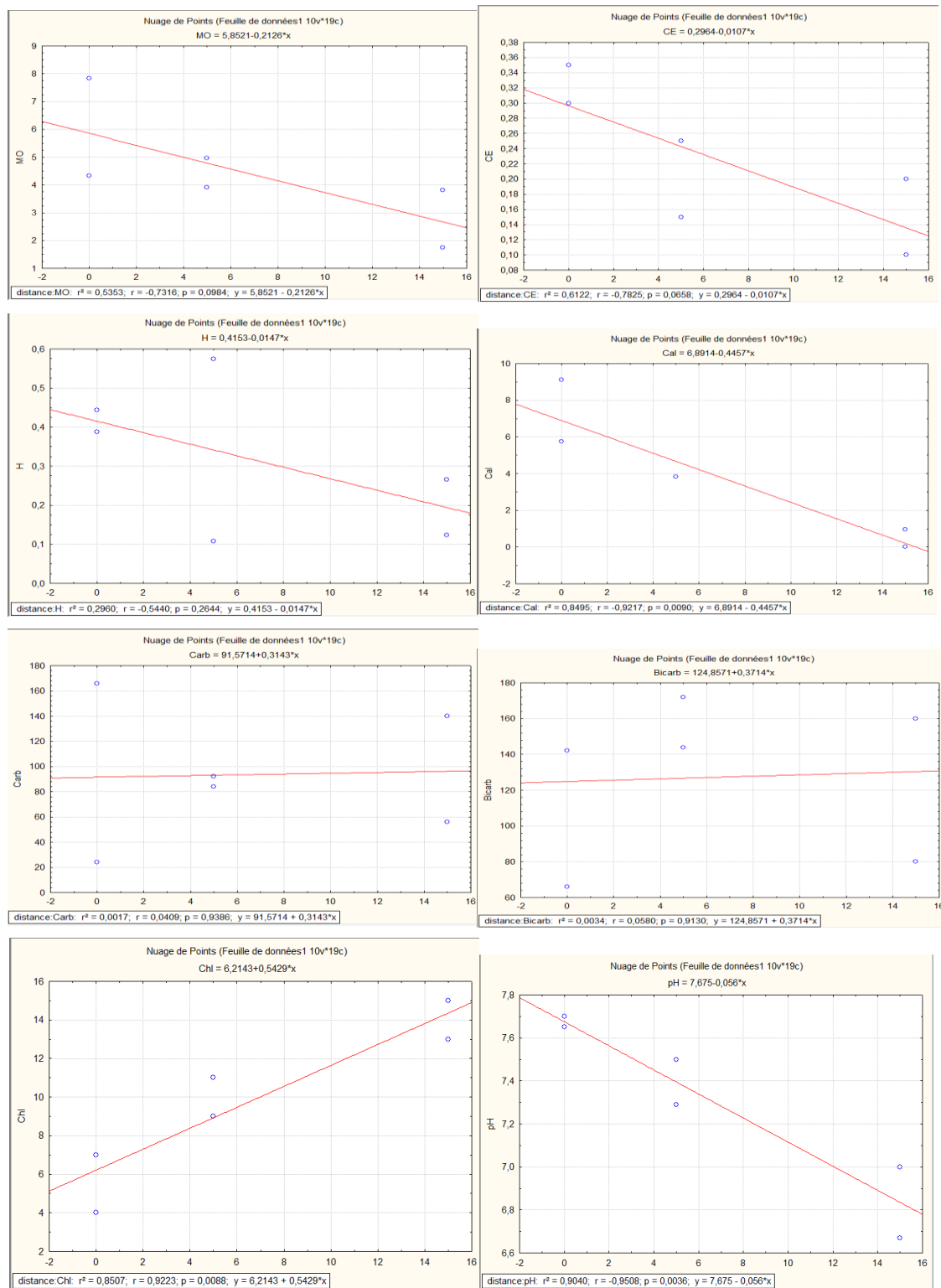


Figure 31 : Régression simple des propriétés du sol en fonction de la distance à la source de pollution.

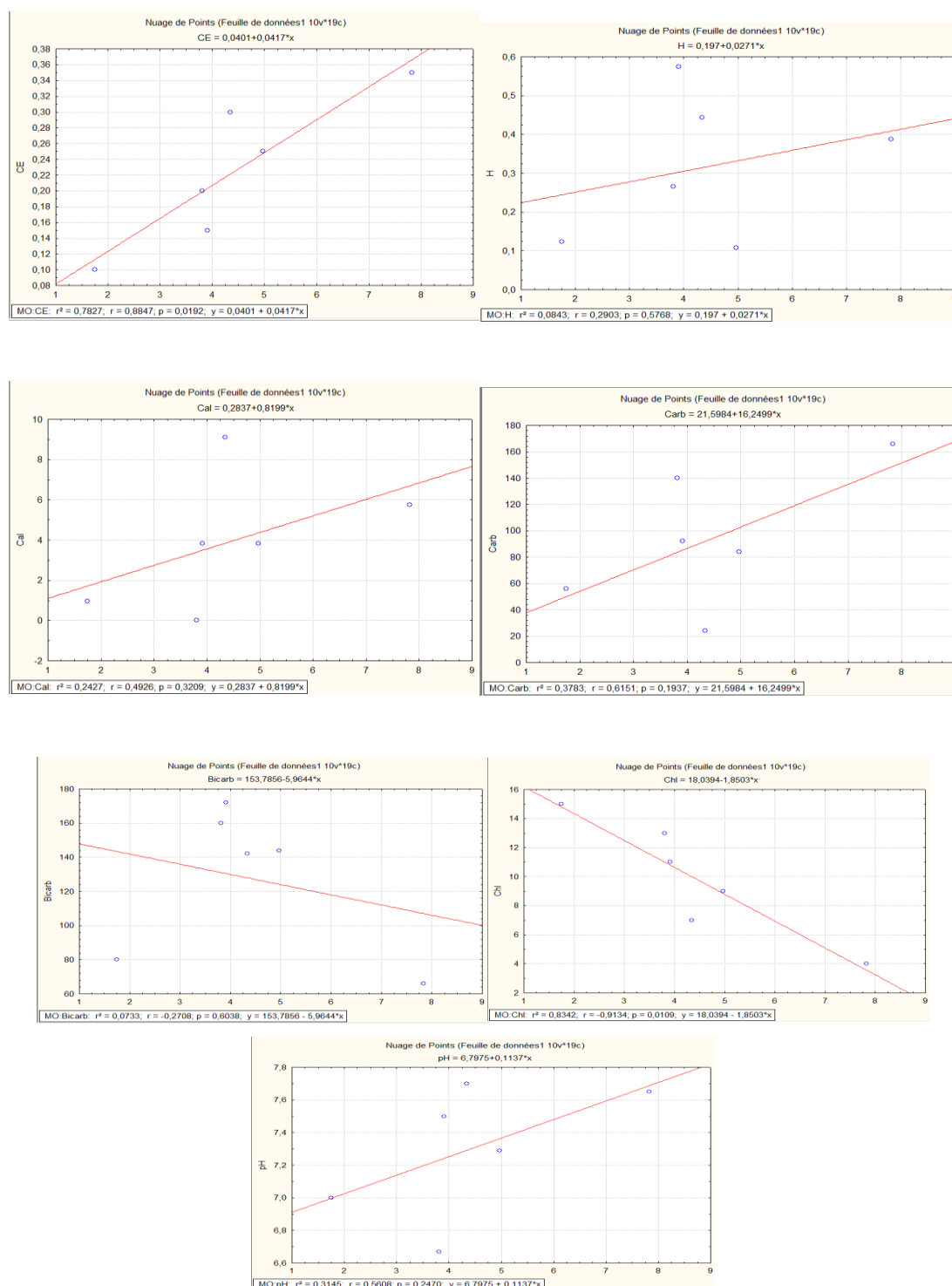


Figure 32 : Régression simple des propriétés du sol en fonction de la teneur en matière organique

- Une teneur élevée en matière organique signifie qu'il y a plus d'hydrocarbures dans le sol car la matière organique englobe les hydrocarbures (sol homogène).
- La corrélation distance- matière organique n'est pas significative, cela signifie que la présence des hydrocarbures a un impact plus important sur les propriétés du sol.

Conclusion et perspectives

Les études menées sur les sols des stations-services de Freha et d'Azazga ces ont montré qu'ils sont généralement contaminés par les hydrocarbures.

D'après les résultats obtenus pendant notre étude, il est possible de conclure que les hydrocarbures ont un impact sur certains paramètres physico-chimiques en raison des changements notables observés lors de la présente étude.

Comme nous l'avons déjà mentionné dans nos résultats, certaines des propriétés des sols étudiés ont été modifiées. Cette situation a entraîné une baisse du pH et une réduction de la teneur du sol en certains paramètres tels que la conductivité électrique, le calcaire totale, le carbone organique et la matière organique. D'autre paramètres ont montré des valeurs plus élevées dans le sol pollué (SP1) et diminuent au fur et à mesure que nous nous éloignons de la source de pollution telle que les carbonates et les chlorures ainsi que l'humidité et les bicarbonates.

La contamination des sols par les hydrocarbures provenant des stations-service a un donc un impact important sur les propriétés physiques et chimiques du sol, avec des conséquences négatives sur la qualité des sols. Il est important de mettre en place des mesures de prévention et de dépollution pour limiter la contamination des sols par les hydrocarbures et protéger l'environnement

Après avoir effectué cette étude, il est possible de proposer différentes perspectives :

- L'analyse des substances polluantes présentes dans le sol des stations-service peut permettre de déterminer l'origine de ces rejets et de supprimer la source de pollution.
- Effectuer des tests sur le terrain (in situ) en appliquant des méthodes de dépollution des sols contaminés par les hydrocarbures telles que la bioremédiation, la phytoremédiation, la bioindication, etc.
- La mise en place des systèmes d'assainissement pour évacuer les déchets des stations-services.

Références bibliographiques

A

- Ahmed, F. and Fakhruddin, A. N. M., 2018. A review on environmental contamination of environment petroleum hydrocarbons and its biodegradation. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Resour.*
- Ali Ahmed, S. (2011). Essai de réhabilitation d'un sol contaminé par les hydrocarbures à l'aide des tensioactifs obtenus par voie biologique. Mémoire de Magister en sciences agronomiques INA d'Alger. 135p.
- Archambault P., Schloss IR., Grant C., Plantes S (2017) les hydrocarbures dans le golfe du Saint-laurent. Enjeux économiques et environnementaux. Notre golfe, RimouskiQc, Canada, 324p.
- Arnaud P., 2004. Chimie organique. Edition DUNOD, Paris. 208p.

B

- BAIZE D., 2000. Guide des analyses en pédologie. 2^{ème} Ed. Tech et pratique INRA Edition. Paris. 412p.
- Battaz S., 2009. Etude comparative de la dégradation d'une terre polluée par les hydrocarbures lourds. Mémoire présenté à la faculté des sciences. Département des sciences fondamentales pour l'obtention de diplôme de magister. 122P.
- Ben Fardia H., Chenine A. (2014). Effets de la nature du sol sur l'efficacité d'un dispositif de bio dépollution à l'aide des bactéries hydrocarboruclastes. Mémoire de master académique en microbiologie appliquée. Université de Mostaganem. 199p.

C

- Calvet R., 2003. Le sol. Tome 1. Propriétés et fonction ; constitution et structure phénomène et interface. Edition France agricole : 1483-1487.
- Colin F., 2000. Pollution des sols et sous-sols par les hydrocarbures et les solvants colorés. Académie des sciences. Rapport n°44. Tec & Doc : 131-132.
- CEAEQ. 2015. Centre d'expérience en analyse environnementale du Québec, 2015. Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale. 41p.
- Charnet F., 2018. Les sols forestiers, Edition IDF_CNPF, paris, 160p.
- Bocard C., 2006 « Marées noires et sols pollués par les hydrocarbures ».
- Clement M., Pieltain F., 2003. Analyse chimique méthode choisies. Ed. TEC & DOC. 382p.

- Carnicer P., 2017. la pollution ponctuelle des sols : le cas des stations-service dans la région de Bruxelles-capitale. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'études spécialisées en gestion de l'environnement. Université libre de Bruxelles. 154p.

D

- Dewis J., Freitas F. (1984). Méthodes d'analyse physique et chimique des sols et des eaux. Paris 280p.
- Duchaufour P., Faivre P., Poulénard J., Gury M. (2018). Introduction à la Science du sol. 7^{ème} Edition sol, végétation, environnement. Dunod, 472P.

F

- Fatal P. (2008). Pollution des sites par les hydrocarbures. Presse universitaire de Rennes : p 80-91.
- Fezani S. et KhiderF. 2007. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes, leurs caractérisations et leurs effets sur la microflore du sol. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. U.M.M.TO 73p.
- FEZANIS. Et KHIDER F., 2007 : toxicité des Hc vis-à-vis des plantes, leurs caractérisations et leurs effets sur la microflore du sol. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie U.M.M.TO 73P.

G

- Gobat J.M., Arango M., Matthey W. 2010. Le sol vivant : bases de pédologie et biologie es sols. Ed. 3^e. Lausanne : presses polytechniques et universitaires Romandes. 820p.
- Gobat J. M., Aragno M et Mathey W.2010. Le sol vivant : Base de pédologie et biologie des sols). 3^{ème} Edition revue et augmentée : 150-165.
- Godwin .S., Jones R.L., & Mackenzie A. E. (2013). Organic Carbon sequestration in polluted Soils: Areview and meta-analysis. Environmental science & technology, 47(17): 9860-9866.
- Gomaz D., 2010 : Etude approfondie de l'influence de la nature chimique des fine polluants d'hydrocarbures sur le calcul de risque sanitaire. Mémoire de fins d'études ingénieur du génie sanitaire. Ecole de haute étude en Santé publique. 74p.
- Gros R. (2004). Fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origine anthropiques : réponses du sol, de la flore et de microflore bactérienne tellurique. Thèse de Doctorat. Centre Interdisciplinaire scientifique de la Montagne, université de Savoie, France 243p.

- Gruyer N., Groleau P., Ouellet A., & Dupont R. (2015). Hydrocarbures pétroliers : caractéristique, devenir et criminalistique environnementale stratégique et GENV23, Evaluation environnementale stratégique globale sur les hydrocarbures. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 55p.

H

- Henin S., 1976. Cours de physique du sol. Ed ORSTOM. 159p.
- Hong S., Piao S., Chen A., Liu Y., Liu L., Peng S., et Zeng H. (2018). Afforestation neutralises soil pH. Nature communication, 9 (1) : 1-7.

I

- IBGE, 2003= Misselyn, P., Squilbin, M. (2003) .Secteur industriel spécifique des stations-services. IBGE, 10p.
- INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), (2009). Edition, division de l'information et de la communication. Avenue de la victoire, BP. 415 RP-Rabat, Royaume du Maroc. 15p.

J

- Jeevanantham S., Saravanan A., Hemavathy R. V., Senthil Kumar P., Yaashikaa P. R. & Yuvaraj D., 2019. Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: A.
- Joumard, F., Bogen, H., Schwank, M., Von Hebel, C., (2018). Ground-based soil moisture determination. Springer International Publishing, 43p.

K

- Koshlaf, E. et Ball A. S., 2017. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. AIMS microbiology, 3(1): 25.

L

- Lee S.H., Kim M. S., Kim J.G., & Kim, S.O. (2020). Use of Soil enzymes as indicators for contaminated soil monitoring and Sustainable management. Sustainability, 12 (19), 8209p.
- Lecomte P., 1998. Les sites pollués : traitement des sols et des eaux souterraines. 2ème Edition Lavoisier TEC et DOC. 204p.
- Legros J.P., 2007. Les grands sols du monde. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, 574p.
- Lemièrre B., Seguin J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger P., Saada A., Colombano S. (2008). Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes. BRGM.103p.

- Lozet et Mathieu., 1997. Dictionnaire de sciences du sol. Lavoisier Tec &Doc. 420p.
- Lumière B., Seguin JJ., Guyonet D., Branger., 2001. Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. BRGM / RP, 99p.

O

- Orée, 2021. Guide interactif de la gestion des risques liés à l'environnement pour les collectivités <http://risques-environnementaux-collectivités.Orée.Orge/le-guide/risques-mon-territoire/santé-environnement/pollution-du-sol.html>.

R

- Radovic J. R. C. Dominguez K., Laffont S. Diez J. W., Readman J., Albaiges et Bayona J. M., 2012. Composition, propriétés caractérisant les huiles transportées couramment et contrôlant leur présence dans l'environnement marin. *Journal of Environmental Monitoring*, 12 (14): 3220-3229p.
- Ramade F., 1992. Précis d'écologie 6^{ème} éditions Masson. Paris. 300p.
- Robert M., 1996. Le sol interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Ed. Masson. 224p.
- Ruellana., et POSSR., (2008). Les sols pour l'avenir de la planète Terre, avenue de la pomme de Pin_BP 20619. 15p.
- Rouquerol T. L., Amir H et Amir. A., 1987. Effet de l'épandage de résidu pétrolier de raffinerie sur l'évolution de la matière organique. L'activité de densité microbienne d'un sol agricole. *Revue d'écologie et de biologie du sol*. 156p.

S

- Saada A., Nowak C., et Coquereau N., 2005. Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures. Rapport intermédiaire résultat de la phase 1.
- Soltener D., 2005. Les bases de la production végétale-le climat-la plante. 21^{ème} Edition science technique agricole, 111p.
- Sposito G., 1997. The chemical composition of soils. The chemistry of soils. Oxford university press. New-York: 3- 27.
- Su Y., chen, Y., shih Y., 2013. Removal of trichloroethylene by zerovalent iron / activated carbon derived from agricultural wastes. *J. Environ. Manage* 129: 362-366.

T

- Tétrault J. (2016). Agent of deterioration: pollutions Canadian. Conservation Institute. 23p.

Annexes

Annexe I : les normes d'interprétation.**Tableau 01 : Normes d'interprétation du pH du sol selon Baize(1989).**

Valeur de pH	Qualification
$\leq 4,5$	Extrêmement acide.
4,6 à 5	Très fortement acide.
5,1 à 5,5	Fortement acide.
5,6 à 6,75	Faiblement acide.
6,75 à 7,3	Neutre.
7,4 à 7,8	Légèrement alcalin.
7,9 à 8,4	Moyennement alcalin.
8,5 à 9	Fortement alcalin.
$\geq 9,1$	Très fortement alcalin.

Tableau 02 : Normes d'interprétation de la conductivité électrique selon Baize(2000).

CE (mmhos/cm à 25°C)	Désignation
$\leq 2,5$	Non salé
2,5 à 5	Faiblement salé
5 à 10	Moyennement salé
10 à 15	Salé
15 à 20	Fortement salé
20 à 27,5	Très fortement salé
27,5 à 40	Excessivement salé
≥ 40	Hyper salé

Tableau 03 : Normes d'interprétation des valeurs du calcaire total du sol « CaCO₃ » selon **GEPPA (1981)**.

%de CaCO₃	Qualification
<1%	Non calcaire
1 à 5%	Peu calcaire
5 à 25%	Modérément calcaire
25 à 50%	Fortement calcaire
50 à 80%	Très fortement calcaire
> 80%	Excessivement calcaire

Tableau 04 : Normes d'interprétation des valeurs de carbone organique selon **Hazelton and Murphy(2007)**.

Carbone organique	Quantification
< 0.4	Extrêmement faible
0.4 à 0.6	Très faible
0.6 à 1	Faible
1 à 1.8	Modéré
1.8 à 3	Elevé
> 3	Très élevés

Tableau 05 : Normes d'interprétation des valeurs de MO selon **Hazelton and Murphy (2007)**.

Teneur en MO (%)	Classe	Interprétation
< 0.5	Très faible	Très pauvre en MO
0.5 _1	Faible	Pauvre en MO
1_ 2	Modérée	Modérément riche en MO
2 _ 3	Bonne	Riche en MO
>3	Très élevées	Très riche en MO

Annexe II : Résultats des analyses.**Tableau 01 : Résultats d'analyses de pH**

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	7,7	7,5	7
Azazga	7,65	7,29	6,67

Tableau 02 : Résultats d'analyses de la Conductivité Électrique (ms/cm)

Station Sol	SP1		SP2		SP3	
	F	A	F	A	F	A
R1	0,4	0,5	0,2	0,3	0,1	0,2
R2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
Moyenne	0,3	0,35	0,15	0,25	0,1	0,2

Tableau 03 : Résultats d'analyses de l'humidité (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	0,4440	0,5742	0,1230
Azazga	0,3875	0,1078	0,2659

Tableau 04 : Résultats d'analyses de Calcaire total (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	9,12	3,84	0,96
Azazga	5,76	3,84	0,00

Tableau 05 : Résultats d'analyses du Carbone total (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	2,52	2,28	1,01
Azazga	4 ,55	2,89	2.21

Tableau 06 : Résultats d'analyses de la M.O (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	4.34	3.91	1,75
Azazga	7.83	4.97	3.81

Tableau 07 :Résultats d'analyse de l'argile (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	0.20	0.55	0.10
Azazga	0.43	0.31	0.37

Tableau 08 :Résultats d'analyse des limons fins (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	0.74	0.69	0.49
Azazga	0.42	0.30	0.41

Tableau 09 : Résultats d'analyse des limons grossiers (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	24.63	72.36	42.43
Azazga	50.16	47.92	61.78

Tableau 10 : Résultats d'analyse du sable grossier (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	63.41	15.52	36.36
Azazga	33.11	36.92	21.07

Tableau 11 : Résultats d'analyse du sable fin (%)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	11.02	10.88	20.71
Azazga	15.88	14.55	16.37

Tableau 12 : Résultats d'analyses des carbonates (Meq/l)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	24	92	56
Azazga	166	84	140

Tableau 13 : Résultats d'analyses des bicarbonates (Meq/l)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	142	172	80
Azazga	66	144	160

Tableau 14 : Résultats d'analyses des chlorures (Meq/l)

Station Sol	SP1	SP2	SP3
Freha	7	11	15
Azazga	4	9	13

- **Annexes III** : Résultats des analyses statistiques avec le logiciel R.

- 1_ Résultats du test de **Kruskal- Wallis** des paramètres physico-chimiques.

- **pH :**

kruskal.test (ph~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: ph by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 4.5714, df = 2, p-value = 0.1017

- **Conductivité électrique :**

kruskal.test (CE~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: CE by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 3.7143, df = 2, p-value = 0.1561

- **Calcaire total:**

kruskal.test (Ca~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: Ca by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 4.7059, df = 2, p-value = 0.09509

➤ **Carbone organique :**

kruskal.test (CO~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: CO by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 3.7143, df = 2, p-value = 0.1561

➤ **Matière organique :**

kruskal.test (MO~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: MO by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 3.7143, df = 2, p-value = 0.1561

➤ **Carbonate :**

kruskal.test (car~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: car by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 0, df = 2, p-value = 1

➤ **Bicarbonates :**

kruskal.test (bic~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: bic by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 2.5714, df = 2, p-value = 0.2765

➤ **Chlorure :**

kruskal.test (chl~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: chl by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 4.5714, df = 2, p-value = 0.1017

➤ **Humidité :**

kruskal.test (h~DaS)

Kruskal-Wallis ranksum test

data: h by DaS

Kruskal-Wallis chi-squared = 1.1429, df = 2, p-value = 0.5647

Résumé

L'objectif du présent travail est d'étudier la modélisation des caractéristiques physiques et chimiques du sol pollué par les hydrocarbures (cas des stations- services). Les échantillons ont été prélevés dans deux stations-services situées à Freha et Azazga.

Les paramètres étudiés sont le pH, la conductivité électrique, le calcaire total, le carbone organique, la matière organique, les sels solubles (carbonates, bicarbonates, chlorures), l'humidité et la granulométrie.

Les résultats obtenus ont montré que les carburants des deux stations-services ont un effet non négligeable et un rôle important dans la modification des paramètres du sol, ce qui est marqué par la diminution de certains paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, le calcaire total, le carbone organique et la matière organique en s'éloignant de la source de pollution et l'augmentation d'autres paramètres tels que les carbonates, les chlorures et l'humidité.

Mots clés : Sol, carburants, stations-services, modélisation, propriétés physiques et chimiques.

Abstract

The objective of our work is to study the modeling of the physical and chemical characteristics of soil polluted by hydrocarbons (case study: gas stations). Samples were taken from two gas stations located in Freha and Azazga.

The studied parameters are: pH, electrical conductivity, total limestone, organic carbon, organic matter, soluble salts (carbonates, bicarbonates, and chlorides), moisture, and granulometry.

The obtained results showed that the fuel of both gas-stations have a significant effect and play an important role in modifying soil parameters, which is marked by the decrease in certain parameters such as pH, electrical conductivity, total limestone, organic carbon, and organic matter, and the increase in others such as carbonates, chlorides, and moisture.

Keywords: Soil, fuels, gas stations, modeling, physical and chemical properties

ملخص:

هدف عملنا هو دراسة نمذجة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة الملوثة بالهيدروكربونات (حالة محطات الوقود). تم أخذ العينات من محطتي وقود تقعان في فريحة وعزازقة. العوامل المدروسة هي: الأس الهيدروجيني، التوصيلية الكهربائية، الكلس الكلي، الكربون العضوي، المادة العضوية، الأملاح الذائبة (الكربونات، البيكربونات، الكلوريدات)، الرطوبة، وتوزيع الحبيبات. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الوقود له تأثير كبير و يلعب دورًا مهمًا في تعديل عوامل التربة، حيث يتم تمييز ذلك بانخفاض بعض ال عوامل مثل الأس الهيدروجيني، التوصيلية الكهربائية، الكلس الكلي، الكربون العضوي، والمادة العضوية، وزيادة البعض الآخر مثل الكربونات، الكلوريدات، والرطوبة. **الكلمات المفتاحية:** الخصائص الفيزيائية والكيميائية، التربة، النمذجة، محطة الوقود.