

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou**  
**Faculté des Sciences Biologique et des Sciences Agronomiques**  
**Département d'Ecologie et Environnement**



## **Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en écologie et environnement

**Spécialité : Biodiversité et Environnement**

### **Thème**

**Caractéristiques physico-chimiques des sols des stations-services de Ain El Hammam et Larbaa Nath Irathen**

**Présenté par : M<sup>elle</sup> Alia Liza**

**: M<sup>elle</sup> Lagab Ferroudja**

**Devant le jury composé de :**

<b>Présidente : M<sup>me</sup> Bachi K</b>	<b>MCB</b>	<b>à U.M.M.T.O</b>
<b>Promotrice : M<sup>me</sup> Sadoudi – Ali Ahmed D.</b>	<b>Professeur</b>	<b>à U.M.M.T.O</b>
<b>Co-promotrice : M<sup>me</sup> Lamri T</b>	<b>MAA</b>	<b>à U.M.M.T.O</b>
<b>Examineur : M<sup>r</sup> Dib D</b>	<b>Docteur</b>	<b>à U.M.M.T.O</b>

**Année universitaire : 2025/2026**

## Remerciements

**Tout d'abord nous remercions Dieu de nous avoir donné les moyens et l'énergie pour réaliser ce travail.**

Nous remercions, **M<sup>me</sup> SADOUDI-ALI AHMED Djamila**, professeur au département d'écologie et environnement 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 ces domaines de compétences.

Nous exprimons notre sincère reconnaissance envers, **M<sup>me</sup> LAMRI Taous MAA**, notre Co-promoteur, pour ces conseils avisés qui ont grandement enrichie notre travail et qui nous ont permis de mener à bien cette recherche.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements aux honorables membres du jury **M<sup>me</sup> Bachi karima MCB et M<sup>r</sup> Dib Djaffer** docteur à L'UMMTO, pour l'attention qu'ils ont accordée à notre recherche et pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et de participer à la soutenance.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **Mlle ALI AHMED CHAFIKA**, MCB à l'UMMTO, pour son aide et ses explications.

Nous souhaitons remercier chaleureusement l'ensemble du personnel du laboratoire de pédologie, du laboratoire commun et du laboratoire du département d'agronomie en particulier **M<sup>me</sup> Tibiche**, l'ingénieur du laboratoire.

Enfin, nous tenons à remercier les responsables des deux stations-services de Larbaa Nath Irathen et de Ain El Hammam, de nous avoir autorisées à prélever des échantillons du sol au niveau de leurs stations.

## Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère famille

Mon cher **Papa** et ma chère **Maman**, pour leurs sacrifices, leurs amours et leurs soutient tout au long de mon parcours. Que dieu vous garde et vous protège.

Ma chère sœur **Ferroudja**, et son mari Zoubir

Mes neveux adorés **Dylan, Dany** et **Alyna**.

Mes chers frères **Oualid ; Mohand** et sa femme **Ibtissam**

Ma nièce adorée **Maëlys**

Mes cousines **Ludmila, Klinia, Dahbia, Mima...**

Mes copines **Lydia, Wissam, Ryma, Djazira, ...**

Mon binôme **Ferroudja**

# Liza

## **Dédicaces**

**Je dédie ce modeste travail à**

**A la plus belle des femmes ; ma maman, ma raison de vivre en témoignage de ma reconnaissance pour sa patience, son amour et ses prières.**

**A mon très cher papa pour la confiance qu'il m'a accordé.**

**Que dieu vous protège.**

**A vous mes chers frères Sofiane et Mahrez, à toi ma princesse et chère sœur Djouher ; je vous souhaite une vie pleine de bonheur, de joie, de réussite et de santé.**

**A la mémoire de ma chère grand-mère, partie trop tôt mais jamais oubliée, ton héritage de courage et d'amour vit en moi.**

**A mes cousines Lynda, Lilia, Fadhma, Kahina, Lity, Celina, ...**

**A Rima, ma force, et à mes amis Wissam, Lydia et Rafe, dont le soutien et la bonne humeur ont rendu ce parcours plus facile et plus agréable.**

**Pour toi ma chérie Liza ; tu as été plus qu'un simple binôme pour moi, merci pour tes efforts.**

**Djoudja.**

## Liste des abréviations

Mo : Matière organique.

CE : Conductivité électrique.

P1 : Prélèvement 1 sol pollué.

P2 : Prélèvement 2 sol peu pollué.

P3 : Prélèvement 3 Sol loin de la source de pollution.

LNI : Larbaa Nath Irathen.

AEH : Ain El Hammam.

R1 : répétition1.

R2 : répétition2.

R3 : répétition3.

mS/cm : Millisiemens par centimètre (unité de conductivité électrique).

Meq/l : Milliéquivalent par litre (concentration d'ions dans une solution).

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure01	Phases du sol (Mermoud, 2006).	5
Figure02	Triangle des textures minérales (USDA, 1999 in Gobat et al., 2010)	6
Figure03	Configuration générale d'une station-service (station-service d'aire d'autoroute) (Patej <i>et al.</i> , 2002).	13
Figure04	Localisation géographique des deux communes (Ain El Hammam et Larbaa Nath Irathen) sur la carte de Tizi-Ouzou	15
Figure05	Localisation du site d'étude au niveau de la station-service d'Ain El Hammam (Google earth, 2025).	16
Figure06	Localisation du site d'étude au niveau de la station-service de Larbaa Nath Irathen (Google earth 2025).	18
Figure07	pH mètre	20
Figure08	Conductimètre	21
Figure 09	Valeurs de pH des sols des deux stations-service	27
Figure 10	Conductivité électrique des sols étudiés LNI et AEH	28
Figure 11	Teneur en calcaire total des sols étudiés	29
Figure 12	Taux de carbone organique des sols des deux stations	30
Figure 13	Taux de matière organique des sols des deux stations-service	31
Figure 14	Taux de bicarbonates des sols étudiés dans les deux stations	32
Figure 15	Taux de chlorures des sols des deux stations	33
Figure 16	Taux d'humidité des sols des deux stations	34
Figure 17	Composition granulométrique des sols étudiés d'AEH	35
Figure 18	Résultats de la projection de la composition granulométrique des sols de la station-service d'A.E.H sur le triangle de texture de l'USDA (1986)	36
Figure19	Composition granulométrique des sols étudiés de L.N.I	37
Figure20	Résultats de la projection de la composition granulométrique des sols de la station-service de L.N.I sur le triangle de texture de l'USDA (1986)	38

# Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b>	
1. Généralités sur le sol .....	4
1.1. Définition du sol.....	4
1.2. Constituants du sol .....	4
1.3. Fonctions du sol .....	6
1.4. Propriétés du sol .....	6
1.4.1. Propriétés physiques .....	6
1.4.2. Propriétés chimiques.....	7
2. Hydrocarbures .....	8
2.1. Définition .....	8
2.3. Origine .....	9
2.4. Classification .....	9
➤ Hydrocarbure aliphatique .....	9
➤ Hydrocarbure cyclique .....	9
2.5. Propriétés physiques.....	9
2.6. Devenir des hydrocarbures.....	10
3. Pollution des sols par les hydrocarbures .....	11
3.1. Définition de la pollution des sols .....	11
3.2. Effet de la pollution sur le sol .....	12
3.3. Sources de pollution par les hydrocarbures .....	12
3.4. Stations-service.....	12

3.4.1. Description de la station-service .....	12
--	----

## **Chapitre 2 : Matériel et méthodes**

1. Présentation des régions d'étude.....	15
1.1. Région d'Ain El Hammam.....	15
1.1.1. Situation géographique et administrative .....	15
1.1.2. Relief et pente .....	16
1.1.3. Climat.....	16
1.1.4. Végétation .....	16
1.1.5. Description du site d'étude .....	16
1.2. Région de Larbaa Nath Irathen .....	17
1.2.1. Situation géographique et administrative.....	17
1.2.2. Relief et pentes .....	17
1.2.3. Climat .....	17
1.2.4. Végétation .....	17
1.2.5. Description du site d'étude .....	18
2. Stratégie de prélèvement .....	18
3. Traitement et préparation d'un sol .....	19
4. Analyses effectuées .....	19
4.1. Mesure du pH.....	19
4.2. Estimation de l'humidité hygroscopique .....	20
4.3. Mesure de la conductivité électrique d'un sol .....	20
4.4. Dosage du calcaire total.....	21
4.5. Dosage des anions .....	21
4.6. Dosage du carbone organique .....	22
4.7. Dosage de la matière organique .....	23
4.8. Granulométrie .....	23
5. Analyses statistiques .....	24

## Chapitre 3 : Résultats et discussion

I.	Résultats .....	27
1.	Paramètres chimiques .....	27
1.1.	Potentiel hydrogène (pH) .....	27
1.2.	Conductivité électrique (CE).....	28
1.3.	Calcaire total .....	29
1.4.	Carbone organique .....	30
1.5.	Matière organique .....	31
1.6.	Sels solubles .....	32
1.6.1	Carbonates .....	32
1.6.2	Bicarbonates.....	32
1.6.3	Chlorures .....	33
2.	Paramètres physiques .....	34
2.1.	Humidité .....	34
2.2.	Granulométrie .....	35
II.	Discussion .....	39
	Conclusion .....	42
	Références bibliographiques	
	Annexes	

# **Introduction générale**

De nos jours, notre environnement est devenu toxique ; l'air que nous respirons, les aliments que nous ingérons, l'eau que nous buvons..., indispensables à la vie, sont devenus vecteurs de substances chimiques dangereuses.

Le sol est une ressource précieuse et indispensable car il fournit des nutriments, des minéraux et de l'eau aux végétaux et aux animaux. Il est considéré comme un habitat pour de nombreux microorganismes (**Battaz, 2009**). Cependant, il constitue l'un des principaux points de fuite environnementale des produits pétroliers d'où la nécessité de le protéger (**Gabet, 2004**).

Les hydrocarbures sont parmi les polluants du sol les plus dangereux et ils constituent 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**).

Les stations-services sont parmi les principales causes des pollutions constatées causées, entre autres, par la corrosion des cuves de stockage, ou des fuites de canalisation entre les citernes et les îlots de pompes ainsi que la séparation des hydrocarbures (**Colin, 2001**).

La pollution des sols par les hydrocarbures constitue une menace très sérieuse pour l'environnement ; les émissions des hydrocarbures dans les divers biotopes terrestres et aquatiques provoquent d'importantes modifications dans les apports aux trois compartiments de la biosphère en comparaison à des flux naturels (**Ramade, 1992**).

L'effet des hydrocarbures sur les propriétés physiques et chimiques du sol a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches tels que Saad et Dendani (2017), Aumar et Sediri (2018) et Chikhaoui et Hettak (2019) dans la wilaya de Tizi-Ouzou ainsi que celui de Fadel et al. (2017) à Constantine.

Au cours de cette recherche, nous avons réalisé une analyse détaillée afin d'évaluer les effets des hydrocarbures sur plusieurs caractéristiques physico-chimiques des sols.

Le présent mémoire est scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente un aperçu bibliographique sur les propriétés physico-chimiques des sols et des généralités sur les hydrocarbures ainsi que sur les stations-services.

- Le deuxième chapitre récapitule les caractéristiques générales des régions et des sites d'étude, les différentes approches adoptées et les protocoles d'analyses utilisés.
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats des différentes analyses ainsi que leur discussion.

Enfin, nous clôturerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre 1**

## **Synthèse bibliographique**

## **1. Généralités sur le sol**

Le sol est un environnement complexe constitué de substances minérales et organiques, ayant une importance capitale pour les écosystèmes. Il renferme divers phénomènes physiques et chimiques, en particulier aux interfaces entre le liquide et le solide, le gaz et le solide, ainsi que le liquide et le gaz. Le sol favorise la croissance et le développement d'une multitude d'organismes vivants, et il est indispensable pour la biogéodynamique des éléments chimiques **(Calvet, 2013)**.

### **1.1. Définition du sol**

Ce qu'on appelle couramment « -sol- » est beaucoup mieux désigné par le terme de couverture pédologique **(Baize et Jabiol, 1995)**.

Le sol est une formation naturelle de surface résultant de la transformation de la roche mère par des processus physique, chimique et biologique, appelés pédogenèse **(Legros, 2007)**.

Les sols constituent un milieu hétérogène à multiples phases, comprenant l'air, l'eau et les substances solides (sable, limon, argile, matière organique, nutriments, écosystèmes...). Ce sont des médias ouverts et vivants, qui partagent matière et énergie avec l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère **(Sposito, 1997)**.

### **1.2. Constituants du sol**

- **Phase solide**

Composé de minéraux et de substances organiques, le sol est constitué, en grande partie, de la fraction solide qui représente approximativement 93 à 95 % de son poids total. La fraction minérale est issue de la décomposition des roches mères. Quant à la matière organique, elle provient principalement des activités des êtres vivants ainsi que des résidus végétaux et animaux décédés **(Calvet, 2003)**.

#### **1. Fraction minérale**

La fraction minérale du sol est composée de particules de différentes tailles, classées en trois catégories principales :

- **Sable** : particules de diamètre compris entre 2000 et 50µm.
- **Limon** : particules de diamètre compris entre 50-2µm.

- Argile : particules de diamètre inférieur à  $2\mu\text{m}$ .

Ces particules minérales forment l'architecture du sol et déterminent sa texture, qui est essentielle pour les propriétés physiques et chimiques du sol (Quénéa, 2004)

## 2. Fraction organique

La partie organique d'un sol est essentiellement constituée de matière organique à la fois vivante et inanimée. Elle comprend des êtres vivants comme les bactéries, les champignons et les lombrics, ainsi que des résidus organiques en décomposition. L'humus est principalement constitué de résidus de plantes et d'animaux qui, après décomposition, forment la matière organique morte. Cette portion a une importance vitale pour la fertilité du sol et la disponibilité des nutriments pour les végétaux (Paul et Clark, 1996).

- **Phase liquide**

La fraction liquide du sol, également appelée solution du sol, occupe une portion variable de la porosité du sol. Elle est composée d'eau contenant différentes substances et minéraux dissous, ainsi que des particules en suspension (Quenea, 2004).

- **Phase gazeuse**

Aussi connue sous le nom d'atmosphère du sol, la phase gazeuse est composée d'un mélange de gaz semblable à celui de l'air, mais avec des variations dans la composition en raison de la profondeur et de l'activité biologique. Elle est principalement composée d'oxygène, d'azote et de dioxyde de carbone. La concentration en  $\text{CO}_2$  étant nettement supérieure à celle de l'atmosphère du fait de l'activité des microorganismes (Calvet, 2003).

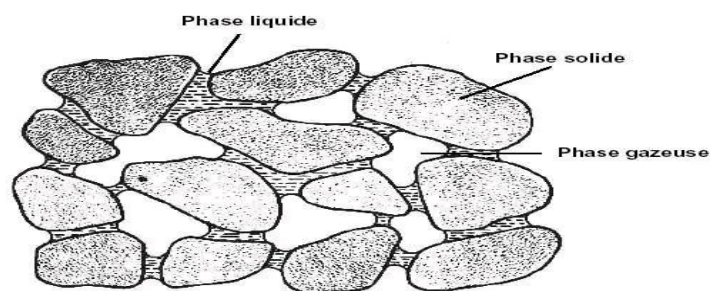


Figure1 : Phases du sol (Mermoud, 2006).

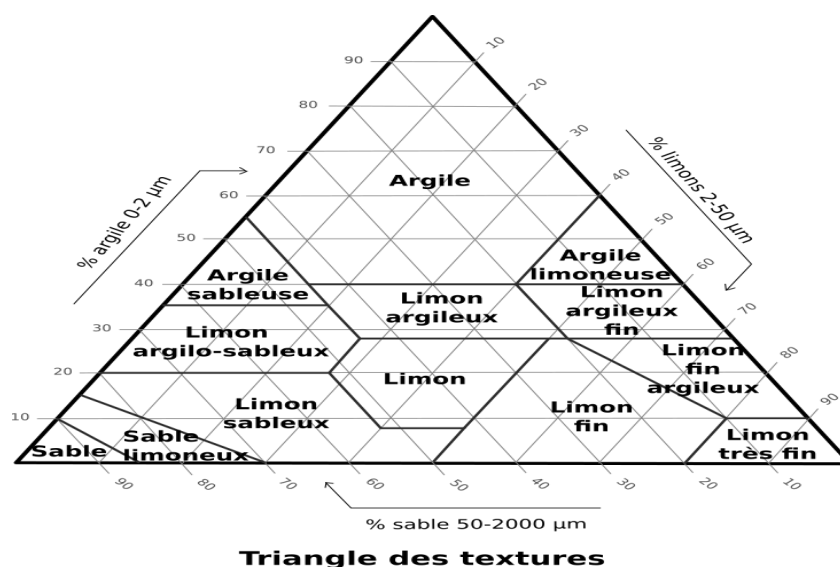
### 1.3. Fonctions du sol

Selon **Ruellan et Poss (2008)**, les sols jouent plusieurs rôles fondamentaux. Ils sont essentiels pour l'agriculture et la sylviculture, agissant comme fondement pour la croissance des végétaux et la production de nourriture. Les sols sont également essentiels pour contrôler les cycles de l'eau et du carbone, ce qui affecte la qualité des eaux et le stockage du carbone. En outre, ils favorisent la biodiversité en hébergeant une vaste diversité d'organismes. Les sols jouent aussi un rôle géotechnique crucial en constituant le fondement des constructions humaines.

### 1.4. Propriétés du sol

#### 1.4.1. Propriétés physiques

- ❖ **La structure** : Selon **Gobat et al.,(2010)**, la composition du sol est une structure complexe, formée d'agrégats minéraux et organiques, qui a un impact sur la porosité et la stabilité de l'écosystème sol. Elle est modelée par les interactions entre les éléments vivants et non vivants.
- ❖ **La texture** : Il s'agit d'une caractéristique qui illustre la composition granulométrique de l'argile, définie par les rapports proportionnels de sable, limon et argile. C'est une caractéristique stable qui a un impact sur divers éléments du fonctionnement du sol, comme la conservation de l'eau, le drainage et la capacité d'échange d'électrolytes. Un triangle de texture est souvent utilisé pour classifier les sols selon leur composition granulométrique (**Gobat et al.,2010**) .



**Figure 2** : Triangle des textures minérales (USDA, 1999 in Gobat et al., 2010)

- ❖ **La perméabilité du sol** : C'est la capacité du sol à permettre le passage de l'eau vers les strates plus profondes. Elle est surtout déterminée par la texture et la structure du sol. Une perméabilité adéquate est cruciale pour le bon équilibre hydrique du sol, facilitant une absorption efficace de l'eau et prévenant l'accumulation excessive d'eau en surface (**Koller, 2004**).
- ❖ **La porosité** : Il s'agit de la portion du volume total que représentent les espaces vides. Elle est cruciale pour la conservation de l'eau et l'aération. Elle est façonnée par la composition et la consistance du sol, ainsi que par les interactions entre les états solide, liquide et gazeux. La porosité comprend des macropores et des micropores ; les premiers étant plus affectés par les fluctuations hydriques, en particulier, dans le cas des sols argileux qui se dilatent et se contractent selon le taux d'humidité (**Calvet, 2003**).

#### 1.4.2. Propriétés chimiques :

- ❖ **Le potentiel d'hydrogène (pH)** : tel que décrit dans les travaux de **Prevost (2006)**, le pH est une mesure cruciale de l'acidité ou de l'alcalinité d'un sol. Il reflète la concentration en ions hydrogène (H<sup>+</sup>) dans la solution du sol et influe de manière significative la disponibilité des nutriments, l'activité microbienne et la croissance des plantes. Un pH optimal, généralement situé entre 6 et 7, est essentiel pour favoriser la fertilité du sol.
- ❖ **Humidité du sol** : C'est un facteur essentiel qui gouverne un grand nombre de processus dans les écosystèmes terrestres. Elle a un impact direct sur le développement des plantes, l'activité des microorganismes, la structure du sol et les échanges de gaz. La quantité d'eau que le sol peut retenir est déterminée par des éléments comme la texture, la structure, le contenu organique, les conditions climatiques et la topographie (**Sayyad et al., 2010**).
- ❖ **Calcaire dans le sol** : Le calcaire peut être présent dans le sol sous forme de morceaux de différentes tailles, allant des blocs et graviers jusqu'aux particules colloïdales argileuses. En règle générale, ces fragments représentent des portions de la roche d'origine. Toutefois, il est également possible que le calcaire soit d'origine biologique et qu'il soit formé, en partie ou entièrement, par des coquilles de gastéropodes (hélicidés) (**Deuris et Fréatas, 1984**).

- ❖ **Conductivité électrique** : C'est un indicateur de la quantité de sels dissous dans le sol. Son niveau de salinité constitue une évaluation approximative de la densité des solutions ionisables contenues dans l'échantillon. L'augmentation des concentrations en cations et anions chargés électriquement conduit à une hausse de cette caractéristique électrochimique d'une solution (Clément, 1998).
- ❖ **La matière organique (MO)** : Il s'agit d'un facteur crucial qui a un impact significatif sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol. Elle optimise la structure du sol en encourageant le développement d'agrégats durables et en accroissant la porosité ; ce qui favorise l'aération et l'écoulement de l'eau. La MO améliore aussi la capacité de rétention d'eau, offrant ainsi une réserve d'eau accessible pour les plantes. En plus, elle demeure une source cruciale de nutriments, stimule l'activité des microbes et participe à la séquestration du carbone (Brady et Weil, 2008).
- ❖ **La capacité d'échange cationique (CEC)** : La CEC est une propriété des sols qui exprime leur aptitude à retenir des cations sous forme échangeable. Elle est considérée comme utile et intéressante pour comprendre la fertilité et les propriétés chimiques des sols. La CEC est influencée par la présence de matière organique, qui peut augmenter cette capacité, particulièrement dans les sols sableux. Elle est mesurée en unités telles que mole par kilogramme (mol/kg) ou milliéquivalents par 100 grammes de sol (mék/100g) (Calvet, 2003).

## 2. Hydrocarbures

### 2.1. Définition

Les hydrocarbures sont des composés organiques qui se composent uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ils constituent la majeure partie du pétrole brut (entre 65% et 95%) et se trouvent dans divers dérivés pétroliers tels que le kérosène, l'essence ou encore l'huile moteur. Ils proviennent de la décomposition de matières organiques mortes et sont présents dans divers compartiments de l'environnement (terre, eau, atmosphère). Ces substances sont essentielles en tant que source d'énergie primaire, tout en étant parmi les polluants les plus menaçants pour l'environnement (Morgan et Watkinson, 1994).

## 2.2. Origine des hydrocarbures

Selon **Battaz (2009)**, les hydrocarbures se créent à partir de débris d'algues, de restes de la faune marine et du plancton. La formation de ces hydrocarbures est le résultat d'un processus qui inclut le vieillissement, la température et la pression exercées sur ces matières organiques au fond des océans.

## 2.3. Classification des hydrocarbures

- **Les hydrocarbures aliphatiques** : Englobent principalement les hydrocarbures saturés, comme les alcanes linéaires (n-alcanes) et ramifiés (iso-alcanes, antéiso-alcanes), ainsi que les cycloalcanes. Dans le pétrole brut, on trouve une grande abondance d'alcanes linéaires et ramifiés, alors que les cycloalcanes peuvent constituer une part importante des hydrocarbures totaux. Les hydrocarbures aliphatiques insaturés tels que les alcènes sont généralement absents dans le pétrole brut d'origine fossile (**Soltani, 2004**).
- **Les hydrocarbures cycliques** : Ils comprennent essentiellement les cycloalcanes et les hydrocarbures aromatiques. Les cycloalcanes sont des composés saturés de nature cyclique, généralement dotés de 5 ou 6 atomes de carbone, et qui peuvent faire l'objet de substitutions. Ils constituent une proportion significative des hydrocarbures totaux présents dans le pétrole brut, variant de 30 à 50%. Les hydrocarbures aromatiques sont des composés polyinsaturés cycliques qui possèdent au moins un cycle avec trois doubles liaisons conjuguées (**Soltani, 2004**).

## 2.4. Propriétés physiques des hydrocarbures

- **Point d'écoulement et viscosité** : La viscosité des hydrocarbures est une caractéristique essentielle qui affecte leur interaction avec l'environnement. Elle est caractérisée par la résistance à l'écoulement d'un fluide et est influencée par la température ainsi que la composition chimique. Les hydrocarbures de faible viscosité tels que l'essence et le diesel sont très liquides et se diffusent rapidement. La température de fluidité est le seuil à partir duquel un hydrocarbure commence à se liquéfier, en dessous de cette température, il devient semi-solide. Ce caractère se rapporte à la création de structures cristallines par les alcanes non cycliques à une température basse (**Fingas, 2011**).

- **Densité** : C'est une caractéristique physique significative qui affecte leur comportement dans un environnement aquatique. Dans le secteur du pétrole, on exprime fréquemment la densité en termes de degré API (American Petroleum Institute gravity), ce qui permet de catégoriser les pétroles selon leur densité par rapport à l'eau. Les pétroles légers possèdent un indice API supérieur à 31,1 ; les pétroles de moyenne densité se situent entre 22,3 et 31,3, tandis que les pétroles lourds ont un indice inférieur à 22,3. Les hydrocarbures ayant un degré API inférieur à 10 possèdent une densité supérieure à celle de l'eau, ce qui les pousse à couler **(Archambault et al, 2017)**.
- **Capacité de dissolution** : Elle est souvent faible, indiquant qu'ils se dissolvent difficilement dans l'eau. Les hydrocarbures pétroliers les plus solubles comprennent des composés aromatiques légers tels que le benzène. L'augmentation de la proportion de fractions légères dans le produit pétrolier entraîne une hausse de la solubilité. Même à des concentrations minimales, les hydrocarbures aromatiques solubles peuvent avoir un caractère toxique pour les êtres aquatiques **(Fingas, 2013)**.
- **Point d'éclair** : C'est la température la plus basse à laquelle un produit pétrolier dégage assez de vapeurs pour créer un mélange inflammable avec l'air. De nombreux hydrocarbures déversés sont facilement inflammables tant que les composés volatils n'ont pas été évaporés. Cette caractéristique est essentielle lors des opérations de nettoyage des déversements d'hydrocarbures du fait du danger d'incendie **(Fingas, 2013)**.

### 2.5. Devenir des hydrocarbures dans le sol

- **Évaporation** : C'est un processus rapide qui a lieu principalement dans les premières heures après une décharge. Les hydrocarbures légers, qui présentent une volatilité élevée, se vaporisent rapidement dans l'atmosphère. Bien que les hydrocarbures solubles soient relativement rares, leur potentiel d'adsorption par la flore et la faune pose une menace environnementale majeure, rendant leur élimination complexe. Les émulsions créées par les hydrocarbures peuvent aussi retarder leur décomposition, en particulier celles composées de résines et de composés polaires **(Soltani, 2004)**.
- **Biodégradation** : Selon **Varjani et Upasani (2017)**, la biodégradation des hydrocarbures pétroliers, est en majorité, réalisée grâce à des processus enzymatiques spécifiques, qui peuvent se produire dans un milieu aérobie (présence d'oxygène) ou anaérobie

(absence d'oxygène). Les bactéries représentent le groupe prédominant de micro-organismes participant à ce processus. Différents éléments tels que la température, le pH, la disponibilité en nutriments et la présence de micro-organismes appropriés influencent la biodégradation. Les biosurfactants sont essentiels pour améliorer la solubilité des hydrocarbures, ce qui facilite leur décomposition par les micro-organismes.

- **Dissolution** : Elle intervient rapidement suite à un déversement et touche principalement les composés polaires aromatiques de faible poids moléculaire, c'est-à-dire principalement les composés de moins de C15. Ces substances présentent une meilleure solubilité dans l'eau et sont facilement biodégradables par les microorganismes, néanmoins, elles demeurent hautement toxiques pour les êtres aquatiques. Même si ce n'est pas le processus prédominant, la dissolution joue un rôle crucial en raison de la toxicité des composés qui se dissolvent (**Prince et al., 2003**).
- **Transformation** : Selon Ali Ahmed (2011), elle peut avoir lieu via des processus biologiques ou non biologiques. Les processus biologiques englobent la biodégradation, qui peut se faire en présence ou en absence d'oxygène, et est effectuée par des micro-organismes tels que les bactéries. Les processus non biologiques englobent l'hydrolyse, l'oxydation et les réactions photochimiques qui entraînent des modifications chimiques des hydrocarbures sans recours à une intervention biologique. Ces modifications peuvent entraîner le déplacement, la transformation ou l'élimination des hydrocarbures

### 3. Pollution de sol par les hydrocarbures

#### 3.1. Définition de la pollution des sols

La contamination des sols constitue une problématique environnementale de premier plan ayant un impact sur la santé des êtres humains et sur les écosystèmes. Les actions humaines ont laissé un patrimoine de sols contaminés partout dans le monde. Parmi les polluants, on trouve les résidus industriels, les pesticides, les fertilisants chimiques et les débris urbains. La contamination des sols peut se traduire par la présence de métaux lourds, de polluants organiques persistants (POP) et d'autres matières toxiques, susceptibles d'avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine (**Swarties, 2011**).

### 3.2. Effet de la pollution sur le sol

La pollution des sols a des impacts significatifs sur la sécurité alimentaire. Elle peut réduire les rendements des cultures car les polluants toxiques dégradent les sols à long terme, et rendent les aliments impropres à la consommation humaine. La pollution des sols peut également affecter la santé humaine en contaminant la chaîne alimentaire, ce qui expose les consommateurs à des risques sanitaires potentiels (Rodríguez-Eugenio et al., 2018).

### 3.3. Sources de pollution par les hydrocarbures

- **Sources naturelles** : Elles comprennent les incendies de forêt, les éruptions volcaniques, l'érosion des roches, les fuites des réservoirs naturels, ainsi que la génération d'hydrocarbures par des plantes supérieures ou des algues. Ces sources participent à la présence d'hydrocarbures dans l'environnement, même si les concentrations les plus significatives sont généralement d'origine humaine (Colin, 2000).
- **Sources anthropiques** : Elles englobent essentiellement les opérations industrielles, comme l'extraction, le stockage, la transformation et le transport des hydrocarbures, ainsi que les activités urbaines telles que les stations-services. Ces opérations peuvent provoquer des déversements accidentels ou volontaires de produits pétroliers, ce qui contribue à la pollution des sols. Les hydrocarbures représentent aussi une source majeure de pollution issue des gaz d'échappement des véhicules (Colin, 2000).

### 3.4. Stations-services

#### 3.4.1. Description de la station-service

Une station-service est décrite en termes de typologie et de conception. Les stations-services se différencient par leur implantation (milieu ouvert ou confiné) et leur type d'exploitation (grands groupes pétroliers ou grande distribution). Une station-service typique comprend trois zones principales : la zone de distribution pour le ravitaillement en carburant, la zone de dépotage pour le stockage des carburants, et la zone de boutique et caisse pour les services commerciaux (Figure3). L'étude se concentre également sur l'identification des risques et la sécurité dans ces installations (Pataj et al., 2002).

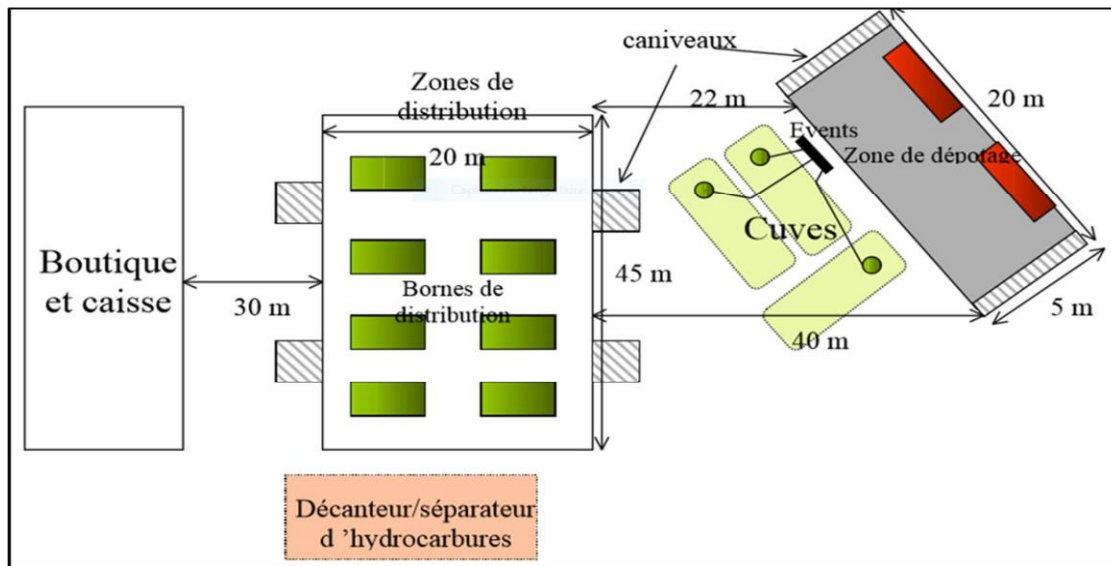


Figure 3 : Configuration générale d'une station-service (station-service d'aire d'autoroute) (Patej *et al.*, 2002).

# **Chapitre 2**

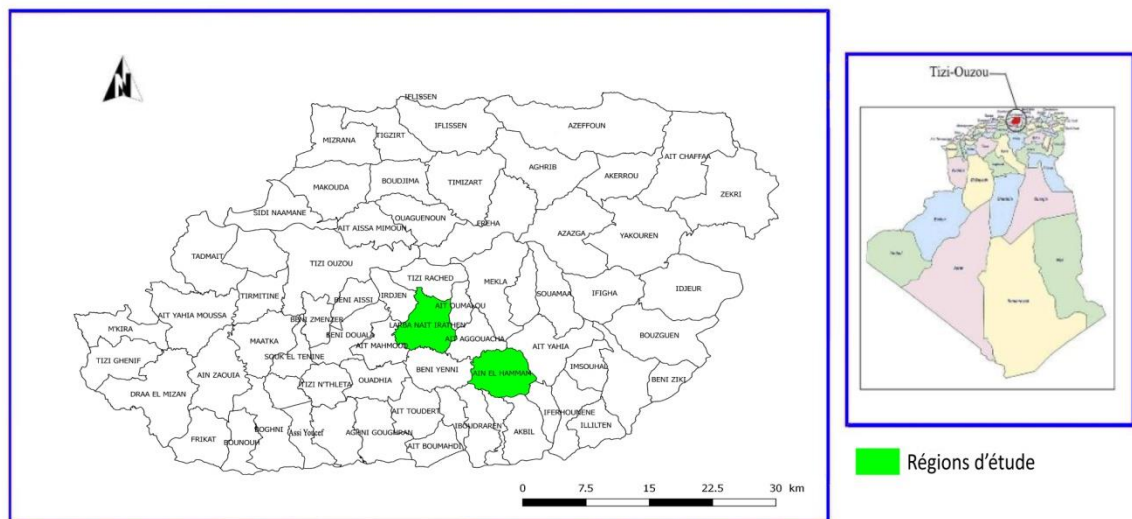
## **Matériel et méthodes**

Cette section de notre étude se compose de deux parties distinctes :

- 🚧 Une partie consacrée à l'échantillonnage sur le terrain ;
- 🚧 Une partie dédiée aux analyses au laboratoire.

### 1. Présentation des régions d'étude

Les deux sites d'étude sont localisés au niveau de la Wilaya de Tizi-Ouzou. Le premier site est localisé au niveau d'une station-service de la commune de Ain El Hammam. Le deuxième site est situé au niveau de la commune de Larbaa Nath Irathen à proximité d'une station-service (Figure 4).



**Figure 4 :** Localisation géographique des deux communes (Ain El Hammam et Larbaa Nath Irathen) sur la carte de Tizi-Ouzou (Originale, 2025).

#### 1.1. Région d'Ain El Hammam

##### 1.1.1. Situation géographique et administrative

Ain El Hammam est une daïra de la willaya de Tizi-Ouzou (grande Kabylie) au nord de l'Algérie. Elle est située au pied de la montagne du Djurdjura. La commune de Ain El Hammam s'étend, en majeure partie, sur le territoire de l'ancestrale tribu (âarch) des Ath Menguellat. La commune de Ain El Hammam a une superficie de 38,55 km<sup>2</sup> pour une population de 20 147 habitants soit une densité de 523 hab/km<sup>2</sup>. Elle est limitée par la commune d'Ait Aggouacha au nord, Aït Yahia à l'est ; Abi Youcef au sud-est ; Akbil, Yattafène et Iboudraren au sud et Beni Yenni à l'ouest (DUC Tizi-Ouzou, 2011).

### 1.1.2. Relief et pentes

Le réseau hydrographique de Ain El Hammam est principalement alimenté par des cours d'eau et des rivières qui descendent des montagnes du Djurdjura (DUC Tizi-Ouzou, 2011).

### 1.1.3. Climat

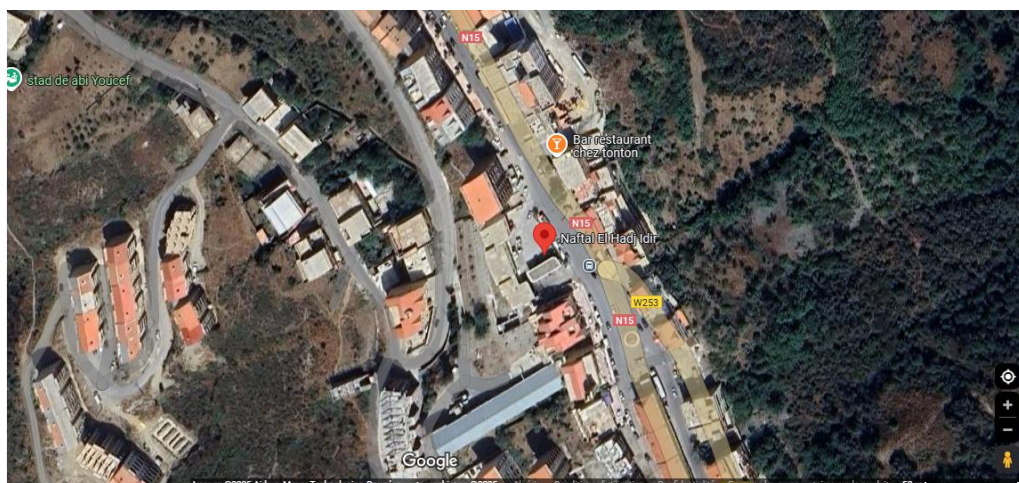
À 'Ain el Hammam, les étés sont courts, chauds, secs et dégagés dans l'ensemble et les hivers sont longs, très froids, avec des précipitations et partiellement nuageux. Au cours de l'année, la température varie généralement de -1 à 30 °C et est rarement inférieure à -5 °C ou supérieure à 33 °C (DUC Tizi-Ouzou, 2011).

### 1.1.4. Végétation

La végétation de Ain El Hammam est typique de la région de la Kabylie et de son environnement montagnard. Elle comprend des forêts de chêne-liège et de pins, des maquis méditerranéens, des prairies alpines et des cultures agricoles (DUC Tizi-Ouzou, 2011).

### 1.1.5. Description du site d'étude

Nous avons prélevé notre 1<sup>er</sup> échantillon, à la station-service de la commune d'Abi Youcef à Ain-El-Hammam, au lieu-dit THACHEKIRTH sur la route nationale N15 menant vers le col de Tirourda. Elle se situe à environ 1200 mètres d'altitude, faisant face à la montagne du Djurdjura (Figure 5).



**Figure 5 :** Localisation du site d'étude au niveau de la station-service d'Ain El Hammam (Google earth, 2025).

## 1.2. Région de Larbaa Nath Irathen

### 1.2.1. Situation géographique et administrative

Larbâa Nath Irathen est une petite ville de Kabylie située au centre-est de la wilaya, à environ 10 km au sud-est de Tizi-Ouzou (16,5 km par la route) et à 80 Km à l'ouest de Béjaïa (120 km par la route). La densité de population est de 747,9 habitants/km<sup>2</sup>. La commune de Larbâa Nath Irathen est limitée par la commune de Ait Oumalou à l'est, la commune d'Ait Aggoaoucha au sud et Tizi Rached au nord. Elle constitue la plus grande ville des environs. Elle est située à 937 mètres d'altitude (DUC Tizi-Ouzou,2011).

### 1.2.2. Relief et pentes

La commune, dont l'altitude moyenne est de 937 mètres, se trouve dans une zone de montagne, sur le versant nord du massif du Djurdjura, qui culmine à 2308 mètres (mont Lalla Khedidja) et dont la ligne de crête, à une dizaine de kilomètres au sud, marque la limite de la wilaya de Tizi Ouzou avec la wilaya de Bouira. Au sud-ouest, la commune est délimitée par la rivière puis le barrage de Taksebt, dont la source se trouve dans la commune d'Ait Boumahdi. Plusieurs cours d'eau affluent de cette rivière arrosent la commune (DUC Tizi-Ouzou, 2011).

### 1.2.3. Climat

Le climat est chaud et tempéré en été. En hiver, il affiche une température de 1°C en moyenne. Chaque année les précipitations sont en moyenne de 1056mm. Elles varient de 169 mm entre les plus secs et les plus humides des mois. Sur l'année, la température moyenne est de 25.6° au mois d'août. Ce qui fait le mois le plus chaud de l'année. Le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne de 3° (DUC Tizi-Ouzou, 2011).

### 1.2.4. Végétation

- ✓ **Forêts de chênes et de pins** : les montagnes de Kabylie, y compris celle autour de Larbaa Nath Irathen, abritent des forêts de chênes verts (*Quercus ilex*) et de pins (*Pinus spp*), qui sont adaptées au climat méditerranéen (DUC Tizi-Ouzou,2011).
- ✓ **Végétation méditerranéenne** : la région est également riche en végétation méditerranéenne typique, incluant des arbustes comme le thym, le romarin et le genêt.

- ✓ **Prairies et culture** : dans les zones les plus basses et les allées, on trouve des prairies et des terres cultivées, où sont souvent plantées des cultures telles que les céréales, les légumes et les fruits (DUC Tizi-Ouzou, 2011).

### 1.2.5. Description du site d'étude

Nous avons prélevé notre deuxième échantillon de sol de la station-service de Larbaa Nath Irathen ; située sur la route nationale N15, sise au centre-ville, en face de la daïra et à proximité du stade communal (Figure 6).



**Figure 6** : Localisation du site d'étude au niveau de la station-service de Larbaa Nath Irathen (Google earth 2025).

## 2. Stratégie de prélèvement

Le prélèvement des échantillons a été effectué durant une seule journée, le 27 janvier 2025. Notre étude expérimentale s'est déroulée à proximité d'une source de pollution, et nous avons choisi de prélever des échantillons dans la couche superficielle du sol, à une profondeur de 0 à 20 cm.

Nous avons délimité trois zones de prélèvement que nous appellerons P1, P2 et P3 dont les dimensions de chacune d'elles sont de 30 cm sur 20 cm.

- Le premier point est un sol très proche de la source de pollution : prélevé à l'intérieur de la station-service, près de la source de pollution.

- Le deuxième point est un sol peu proche de la source : prélevé à l'entrée de la station à une distance de 15 mètres par rapport à P1.
- Le troisième point est un sol très éloigné de la source de pollution : prélevé à environ 30 mètres de la source de pollution.

### **3. Traitement et préparation des sols**

Les échantillons de sol prélevés sur le terrain ont été transportés dans des sachets en plastique au laboratoire, où ils ont été étalés sur les paillasses, pendant 5 jours afin d'être séchés à l'air libre. Puis, ils sont broyés manuellement afin de les réduire en particules fines et tamisés avec un tamis dont le diamètre des mailles est de 2mm. Ils sont, ensuite étiquetés et conservés dans des sachets dans un endroit sec jusqu'à leur analyse.

Les analyses chimiques sont réalisées au niveau du laboratoire de pédologie et le laboratoire commun de la faculté des sciences biologiques et des sciences agronomiques de l'UMMTO.

### **4. Analyses effectuées**

#### **4.1. Mesure du pH**

Le pH d'une solution dépend de la concentration relative des ions  $H^+$  et  $OH^-$  ; si les ions  $H^+$  sont majoritaires, la solution sera acide et si, au contraire, ce sont les  $OH^-$  l'emportent, la solution sera basique.

Nous avons adopté le mode opératoire suivant :

- Peser 20g de terre fine séchée à l'air.
- Porter dans un bécher de 100 ml ;
- Ajouter 50 ml d'eau distillée ;
- Agiter la suspension pendant quelques minutes grâce à un agitateur en verre ;
- Laisser la suspension au repos pendant 15minutes ;
- Mettre l'électrode dans la solution à analyser puis effectuer la mesure après la stabilisation de l'appareil (pH mètre).

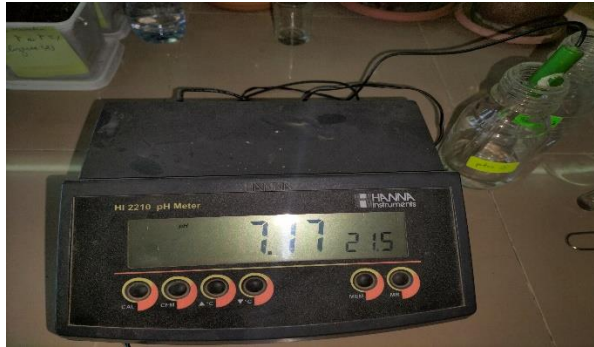


Figure 7 : pH mètre (Originale, 2025).

#### 4.2. Estimation de l'humidité hygroscopique

La quantité d'eau que contient un sol à un moment donné est dite, humidité de ce sol. Lors de la préparation du sol aux différentes analyses, il est généralement séché à l'air, jusqu'à ce qu'il devienne sec.

Cependant, un tel sol contient encore une certaine quantité d'eau. Cette eau est due au fait que le sol peut absorber la vapeur d'eau de l'air, et la retenir solidement à la surface de ses particules.

- Nous avons pesé 5 g de sol tamisé à 2 mm. En utilisant une étuve à 105 °C, nous avons laissé l'échantillon sécher pendant 24 heures. Après le séchage, une seconde pesée a été réalisée. Le taux d'humidité est calculé selon la formule suivante :

$$H \% = \frac{a-b}{b} \times 100$$

- **a** : prise du poids du sol (g).
- **b** : prise du poids du sol après séchage à 105°C (g) pendant 24h.

#### 4.3. Mesure de la conductivité électrique d'un sol

La conductivité électrique d'une solution dépend de sa concentration en électrolytes.

Nous avons pesé 20 g de sol tamisé au travers d'un crible de 2mm, que nous avons placé dans un bécher ; auquel nous avons ajouté 50 ml d'eau distillée. Après une agitation de 2 minutes avec un agitateur mécanique ou magnétique, nous avons laissé la solution au repos pendant 30 minutes. Ensuite, nous l'avons filtré puis refiltré et nous lui avons ajouté 2 gouttes d'Hexamétaphosphate de sodium à 0,1 %. Nous avons placé l'électrode du

conductimètre à l'intérieur du bécher qui contient la solution. Par la suite, nous avons noté la valeur qui apparaît sur l'écran de l'appareil.



Figure 8 : Conductimètre (Originale, 2025).

#### 4.4. Dosage du calcaire total

Nous avons pesé 1g de terre fine, tamisée au travers d'un rible à 2 mm, dans un bécher de 250 ml. Nous avons ajouté exactement 20 ml d'acide chlorhydrique à N et avons également ajouté 100 ml d'eau distillée. Nous avons porté le bécher sur un bain de sable à 60 °C, en agitant de temps en temps pendant 45 minutes. Nous avons laissé bouillir pendant quelques minutes, puis agité. Ensuite on a décanté le mélange sur un filtre dans une fiole de 250 ml. Après refroidissement, nous avons prélevé 100 ml du filtrat et les avons versés dans un bécher de 400 ml après avoir bien lavé notre sol et bien rincé le récipient de prélèvement. Nous avons ajouté quelques gouttes de phénolphtaléine à 2 % et avons titré le reste d'acide chlorhydrique avec de la soude à N. Le virage ce produit vers le rouge violacé.

#### 4.5. Dosage des Anions

- **Carbonates** : cette détermination repose sur la neutralisation d'un volume de solution par un acide minéral, dilué, en présence d'un indicateur coloré.

Nous avons adopté le mode opératoire suivant :

Prélever une fraction aliquote de 10 ml de l'extrait, ajouter quelques gouttes de phénolphthaléine.

- Si une coloration rouge se développe, titrer doucement avec  $H_2SO_4$  à 0,1 N, jusque à décoloration totale.
- S'il n'y a pas de coloration après addition de phénolphthaléine, il n'y a pas de carbonate dans l'échantillon.

- **Bicarbonates** : après dosage des carbonates, ajouter dans la même prise d'essai quelques gouttes de méthyl orange, et titrer avec le même acide jusqu'au virage du jaune à l'orange.
- **Chlorures** : ajouter dans une prise d'essai, 1 à 8 gouttes de chromate de potassium, titré par le nitrate d'argent en solution à 0,02N. Le virage se produira vers le rouge.

#### 4.6. Dosage du carbone organique

Le carbone organique est déterminé par la méthode ANNE (méthode à chaud), comme suit :

Dans une fiole conique de 250ml mettre :

- 0,5 ou 0,25 de terre fine, la prise d'essai ne doit pas contenir plus de 30mg de carbone afin d'éviter une transformation totale du bichromate de potassium en sulfate de chrome de couleur verte.
- 10ml de solution de bichromate à 8% ; cette prise se fera à la pipette.
- 15ml d'acide sulfurique concentré.
- Mettre à ébullition modérée pendant 5min, puis laisser refroidir.
- Transvaser dans une fiole jaugée de 200ml et laver l'erenmeyer avec 150ml d'eau distillée, compléter au volume.
- Après homogénéisation, prélever à l'aide d'une pipette 20ml de solution et les transvaser dans un erlenmeyer de 250ml.
- Diluer avec environ 150ml d'eau distillée.
- Ajouter 3 à 4 gouttes de diphénylamine, c'est l'indicateur qui fait passer la solution du brun violacé au bleu vert.
- Ajouté 1,5g de fluorure de sodium (NAF) en poudre ou 5ml de solution à 3%.
- Titrer en agitant avec la solution de sel de Mohr à 0,2N. La couleur passe du brun violacé au bleu vert.

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

$$C\% = \frac{(V_t - V_e) \times 0,615 \times 10 \times 100}{P}$$

$V_t$  : volume titré de la solution de sel de Mohr de l'échantillon témoin.

$V_e$ : volume titré de la solution de sel de Mohr de l'échantillon.

$P$  : Poids du sol en mg.

#### **4.7. La matière organique**

On admet que C représente environ 58% de la matière organique totale. Le résultat du dosage permet donc d'évaluer la teneur en matière organique du sol.

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

#### **4.8. Granulométrie**

Cette analyse permet de connaître la répartition des différentes tailles de particules constituant le sol suivant cinq classes : les argiles, les limons fins, les limons grossiers, les sables fins et les sables grossiers.

Sur un échantillon de terre séchée à l'air et tamisée à 2 mm, on détruit la M.O. Qui joue un rôle de ciment entre les particules argileuses. La terre est ensuite agitée avec une solution alcaline qui provoque la dispersion et laissée au repos pour permettre la sédimentation des particules qui tombent avec des vitesses d'autant plus grandes qu'elles sont plus lourdes suivant la loi de Stokes et le tamisage.

#### **Mode opératoire :**

##### **1) Attaque à froid : traitement préliminaire, destruction de la matière organique et des carbonates.**

- Introduire 20g (p) de terre séchée à l'air libre et tamisée avec un tamis de 2mm dans un bécher de 600 ou 800ml (forme-haute).
- Ajouter 40ml d'ED et agiter le bécher à la main puis ajouter avec précaution 10ml d' $H_2SO_4$  à 30%, couvrir immédiatement d'un verre de montre.
- Laisser réagir à température ambiante pendant une nuit.

##### **2) Attaque à chaud :**

- Ajouter quelques millilitres 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'ED autour de la paroi du bécher pour descendre la mousse et de ne pas laisser l'échantillon aller au sec.
- Ajouter de temps en temps quelques gouttes d' $H_2O_2$  pour s'assurer que l'échantillon n'est plus humifère.
- La réaction est terminée quand la mousse disparaît.
- Ne jamais laisser l'échantillon aller à l'état sec.
- Laisser refroidir.

**3) Dispersion chimique / mécanique, sédimentation :**

- Transvaser le sol dans un flacon d'agitation, bien rincer le bécher et le verre de montre.
- Ajouter 40ml de la solution dispersante Hexamétaphosphate de sodium (50 g/l) et 1ml de  $NH_3$ .
- Remplir à demi les allonges, avec de l'eau déminéralisée.
- Prévoir une allonge contenant 40ml de la solution dispersante diluée à 1000ml (blanc).
- Agiter les flacons avec un agitateur rotatif, pendant 2heures.
- Après agitation, transférer tout le contenu des flacons d'agitation dans les allonges de 1000ml et laver au besoin avec de l'eau distillée, puis compléter les allonges avec de l'E.D jusqu'au trait de jauge.
- Prévoir une éprouvette de 1000 ml contenant 40 ml d'hexamétaphosphate de sodium et compléter au volume avec l'eau distillée (le témoin).

**4) Prélèvement :**

- 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) après le temps de sédimentation nécessaire et à la profondeur retenue.

**5. Analyse statistiques**

Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs et du test de Kruskal-Wallis lorsque la normalité n'est pas vérifiée. La normalité des

données a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk, avec une p-value supérieure à 0.05 pour chaque paramètre étudié. Ces analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R4.1.1, la différence est considérée significative pour p-value < 0,05.

# **Chapitre 3**

## **Résultats et discussion**

## I. Résultats

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 Larbaa Nath Irathen et Ain El Hammam. Nous présenterons dans ce chapitre les résultats des différents paramètres étudiés selon un gradient de pollution.

### 1. Paramètres chimiques

#### 1.1. Potentiel hydrogène (pH)

Les résultats de la détermination du pH pour les sols étudiés sont illustrés par la figure 9.

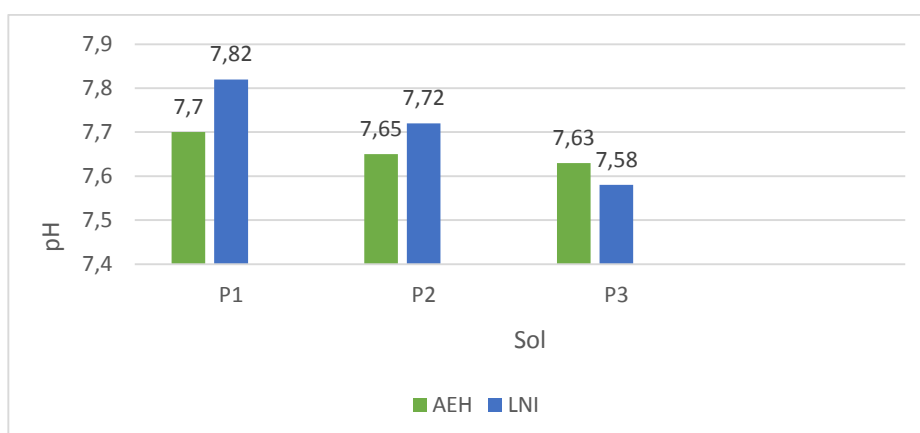
L'étude des résultats indique que le pH des sols diminue en fonction du niveau de pollution.

Les valeurs du pH les plus élevées, soit 7,7 à AEH et 7,82 à LNI, correspondent aux sols contaminés (P1).

Le pH, diminue légèrement dans les sols peu pollués (P2) avec 7,65 à AEH et 7,72 à LNI.

Il enregistre une valeur plus basse de 7,63 à AEH et 7,58 à LNI dans les sols les plus distants de la source de contamination (P3).

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas une différence significative entre les valeurs du pH mesurées dans les deux stations étudiées (p-value= 0,5097) et entre les points de prélèvements.



**Figure 09** : Valeurs du pH des sols des deux stations-services de AEH et LNI

### 1.2. Conductivité électrique(CE)

Les données relatives à la conductivité électrique des sols analysés sont illustrées dans la figure 10.

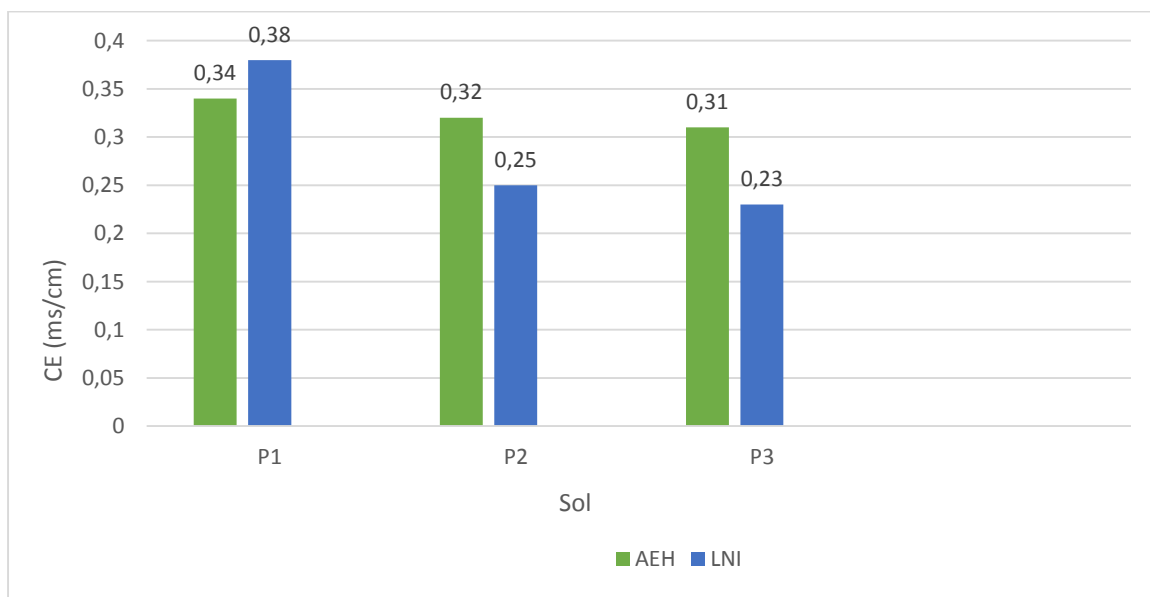
Nous constatons une baisse du taux de la CE dans les deux stations-services.

Les sols contaminés (P1) affichent les plus hauts niveaux de conductivité électrique, soit 0,34ms/cm à AEH et 0,38ms/cm à LNI.

La conductivité électrique (CE) se réduit légèrement dans le sol peu contaminé (P2) avec 0,32ms/cm à AEH et 0,25ms/cm à LNI.

Elle atteint un minimum de 0,31 ms/cm à AEH et de 0,23 ms/cm à LNI dans le sol le plus éloigné de la source de pollution (P3).

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas une différence significative entre les concentrations de la CE mesurées dans les deux stations étudiées (p-value = 0,1646) et entre les points de prélèvements.



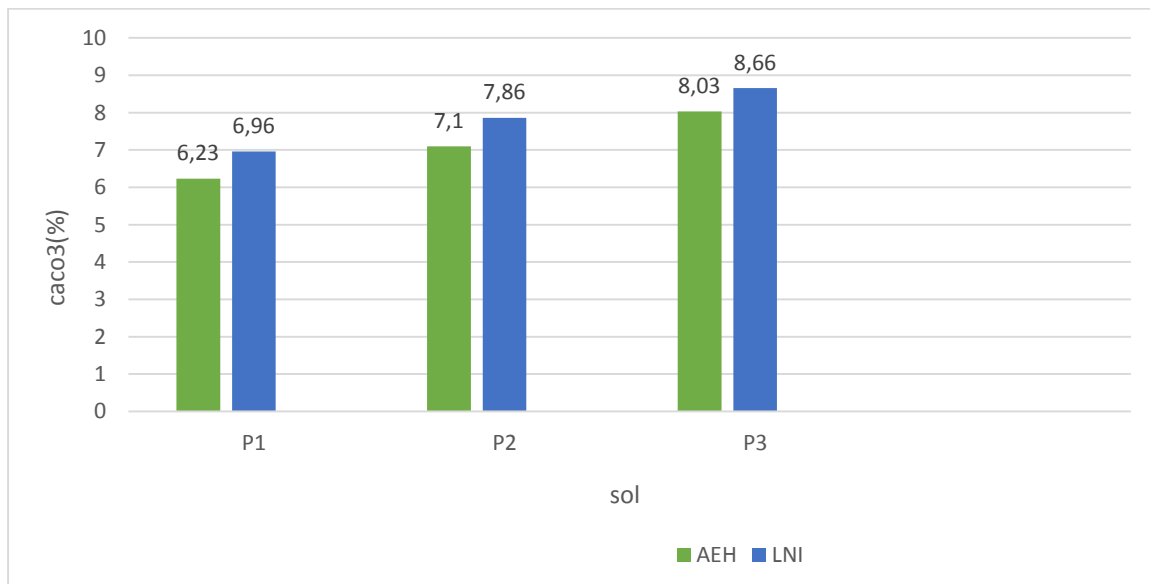
**Figure 10** : Conductivité électrique des sols des deux stations-services de LNI et AEH

### 1.3. Calcaire total

La figure 11 illustre les résultats de la teneur en calcaire total des sols prélevés dans les deux stations. Nous remarquons une augmentation de la teneur en calcaire dans les deux stations-services.

Les relevés du sol pollué présentent une valeur minimale en calcaire qui est de 6,23% à AEH et de 6,96% à LNI. Puis elle augmente légèrement dans le sol peu pollué avec 7,1% à AEH et de 7,86% à LNI, pour atteindre une valeur importante dans les sols les plus éloignés de la source de pollution estimée à 8,03% à AEH et 8,66% à LNI.

D'après les résultats du test d'**ANOVA**, il n'y a pas une différence significative entre les valeurs du calcaire mesurées dans les deux stations étudiées (p-value= 0,4116).



**Figure 11** : Teneur en calcaire total des sols des deux stations de AEH et LNI

#### 1.4. Carbone organique

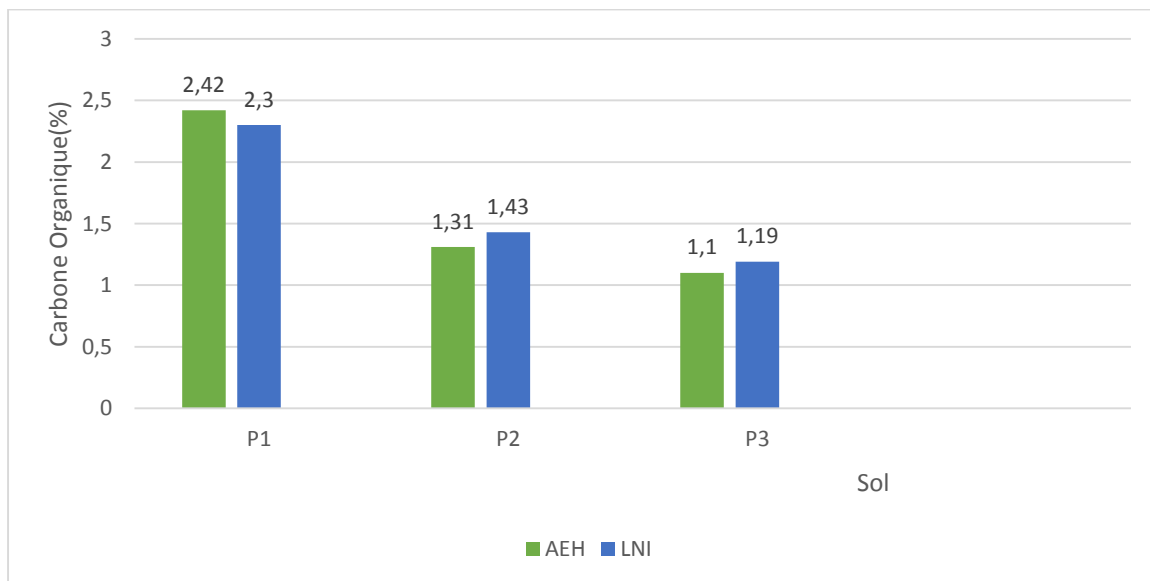
Les résultats concernant la teneur en carbone organique des sols, provenant de deux stations, sont présentées dans la figure 12.

Les données indiquent que les niveaux de carbone dans les deux sites sont importants dans les sols contaminés (P1), avec des taux atteignant 2,42 à AEH et 2,3 % à LNI.

Dans les sols peu contaminés (P2), le niveau de carbone baisse à 1,31 et 1,43% à AEH et LNI respectivement.

Dans les sols situés plus loin de la source de contamination, la teneur en carbone baisse davantage pour se stabiliser à 1,1 à AEH et 1,19 % à LNI.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de carbone organique mesurées dans les deux stations étudiées (p-value= 0,09979).



**Figure12** : Taux du carbone organique des sols des deux stations-services de AEH et LNI.

### 1.5. Matière organique

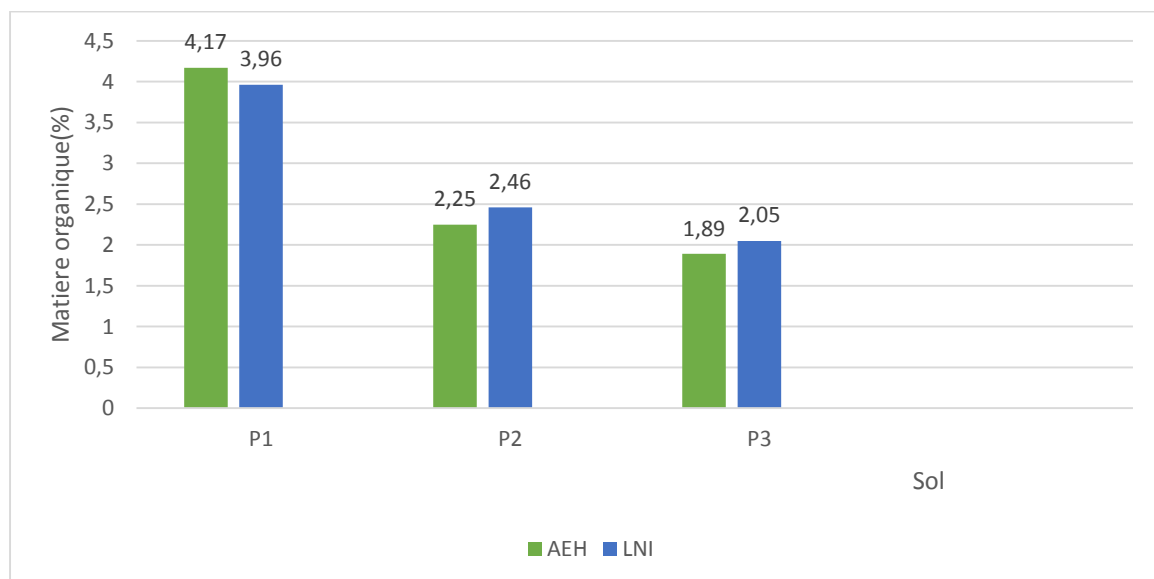
Les résultats de la détermination de la teneur en matière organique des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 13.

Nous constatons que le niveau de la matière organique s'accroît en fonction du gradient de pollution.

Des niveaux élevés sont notés dans les sols contaminés (P1) au niveau des deux sites, avec des pourcentages atteignant 4,17% à AEH et 3,96 % à LNI.

Les valeurs les plus basses sont de 1,89% et 2,05%, relevées au niveau du sol loin de la source polluante (P3), à AEH et LNI respectivement.

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= 0,09384).



**Figure 13** : Taux de matière organique des sols des deux stations-services de AEH et LNI.

## 1.6. Sels solubles

### 1.6.1. Carbonates

Les études menées sur les sols pour déterminer la concentration en carbonates ont révélé l'absence totale de ce type de sel dans les sols des deux stations-service LNI et AEH.

### 1.6.2. Bicarbonates

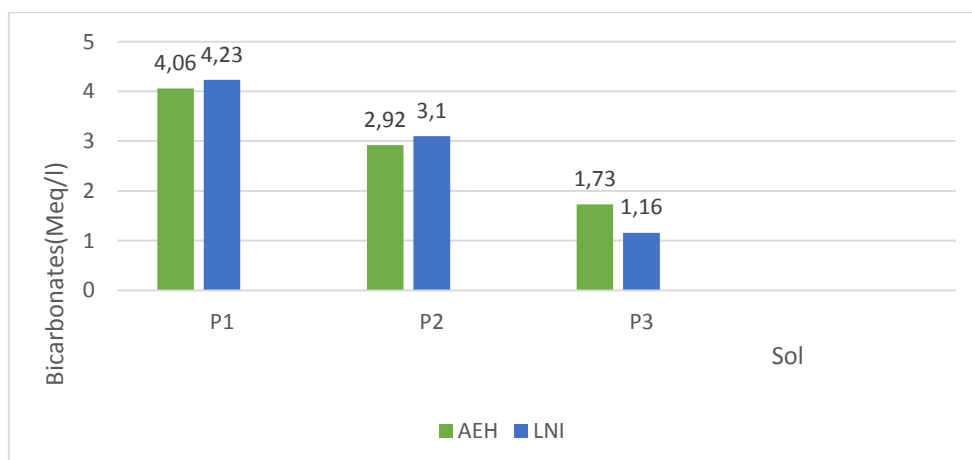
Les résultats de dosage des bicarbonates des sols étudiés dans les deux stations sont illustrés par la figure 14.

D'après les résultats illustrés dans la figure 14, les sols non pollués présentent les taux de bicarbonate le plus faible estimés à 1,73 Meq/l à AEH et 1,16 Meq/l à LNI.

Les sols très pollués présentent le taux de bicarbonate élevé de l'ordre de 4,06 Meq/l à AEH et 4,23 Meq/l à LNI.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il y a une différence significative entre les concentrations des bicarbonates mesurées dans les deux stations étudiées (p-value= 0,0195).

Le test de Newman et Keuls concernant les bicarbonates, a fait ressortir 3 groupes homogènes. Le groupe **a** concerné le P1 avec une moyenne de 20,58 Meq/l. Dans le groupe **b**, nous avons le P2 avec une moyenne de 12,75 Meq/l. Enfin, le groupe **c** renferme le SP3 avec une moyenne de 0,17 Meq/l.



**Figure 14** : Taux des bicarbonates des sols des deux stations-services de AEH et LNI.

### 1.6.3. Chlorures

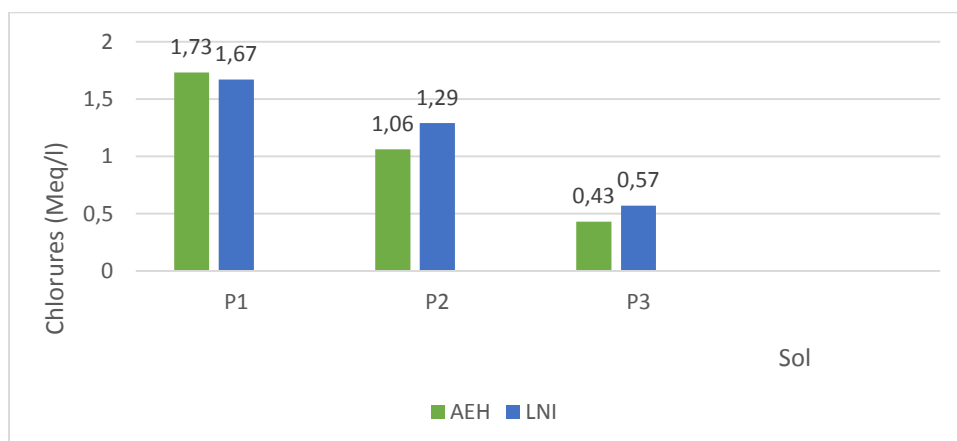
Les données de dosage des chlorures des sols étudiés dans les deux stations sont illustrées par la figure 15.

Les relevés du sol non pollué présentent une valeur minimale en chlorures qui est de 0,43 Meq/l à AEH et de 0,57 Meq/l à LNI.

Puis elle augmente légèrement dans le sol peu pollué avec 1,06még/l à AEH et de 1,29még/l à LNI et atteint une valeur importante dans les sols pollués estimée à 1,73 Meq/l à AEH et 1,67 Meq/l à LNI.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il y'a une différence significative entre les concentrations en chlorures dans les deux stations étudiées (p-value= 0,001611).

Le test de Newman et Keuls a fait ressortir 3 groupes homogènes concernant le taux de chlorures. Le groupe **a** correspond au P1 avec un taux moyen de chlorures de 20,58 Meq/l. Le groupe **b** renferme le P2 avec un taux moyen de chlorures de 12,66 Meq/l. Enfin, le groupe **c** concerne le P3 avec un taux moyen de chlorures de 4,66 Meq/l.



**Figure 15** : Teneur en chlorures des sols des deux stations-services de AEH et LNI.

## 2. Paramètres physiques

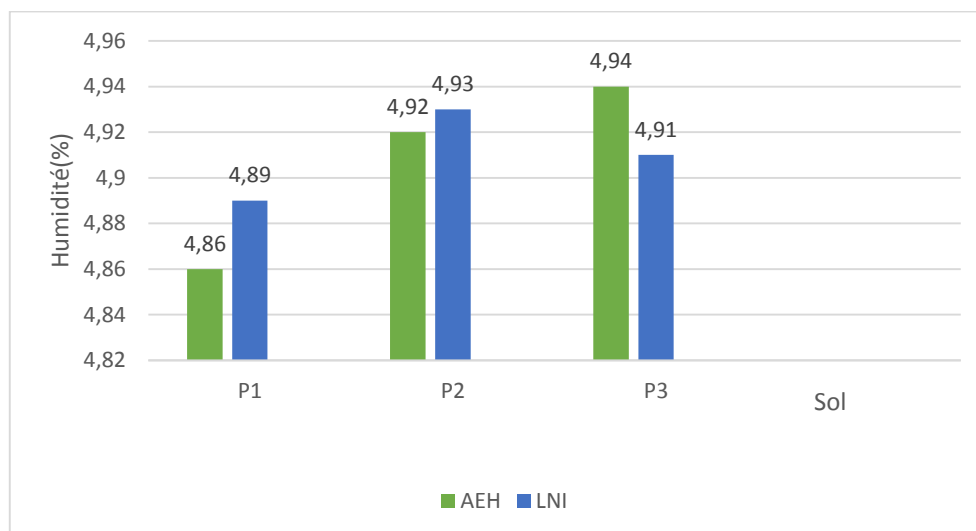
### 2.1. Humidité

Les données sur l'humidité des sols des deux stations sont présentées dans la figure 16. Les valeurs de l'humidité des trois sols varient entre 4,86 et 4,94% ce qui indique une augmentation du taux d'humidité des sols en fonction du gradient de pollution.

Pour la station de LNI, le deuxième échantillon (sol peu pollué) présente le taux d'humidité le plus élevé avec 4,93%. Le premier échantillon (sol pollué) et le troisième échantillon (sol non pollués) présentent des taux respectifs de 4,86 et 4,91 %.

Pour la station d'A.E.H, plus on s'éloigne de la source de pollution, l'humidité du sol augmente. Le troisième échantillon (sol non pollué) présente la teneur la plus élevée avec une valeur de 4,94%, le premier et le deuxième échantillon présentent des taux respectifs de 4,86 et 4,92%.

D'après les résultats du test de **Kruskal-Wallis**, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs d'humidité mesurées dans les deux stations étudiées ( $p$ -value= 0,1709) et entre les points de prélèvement.



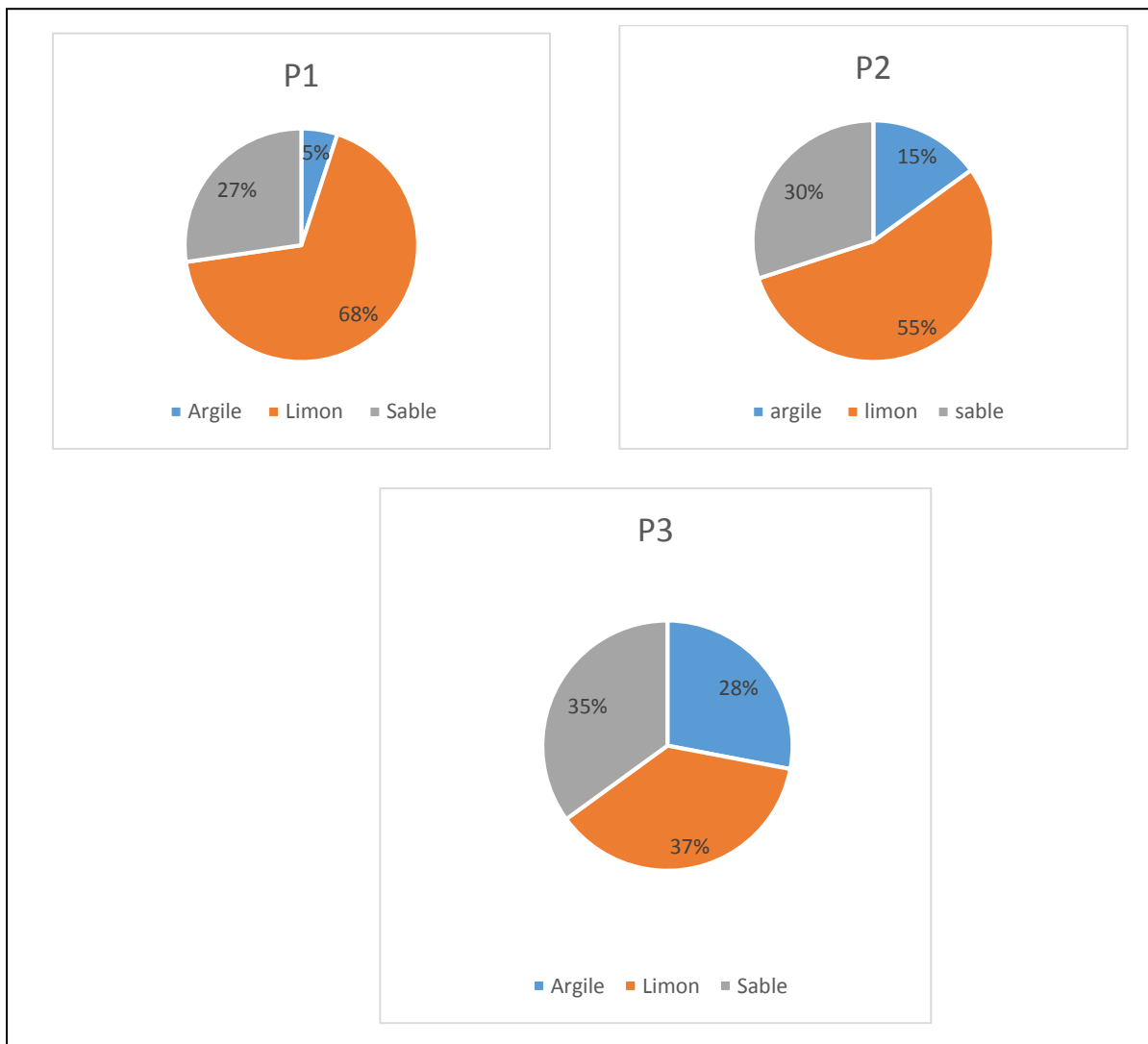
**Figure 16** : Taux d'humidité des sols des deux stations-services de AEH et LNI.

## 2.2. Granulométrie

### • Station-service d'Ain-El-Hammam

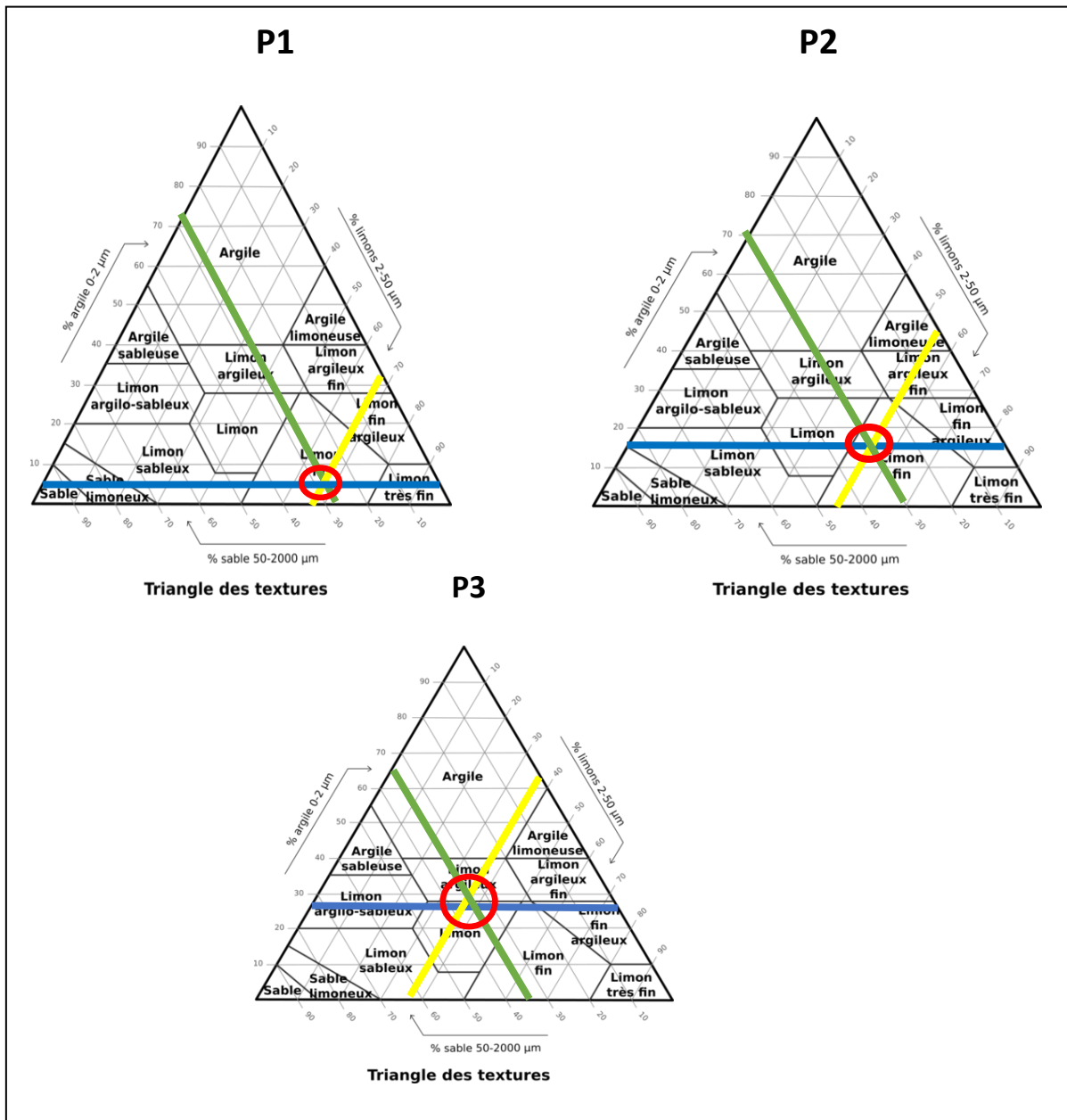
Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons prélevés dans la station-service d'A.E.H sont illustrés par la figure 17.

Les résultats obtenus pour le sol pollué (P1) ont révélé que les taux moyens en Argile, Limon et Sable (%) sont respectivement de 5, 68 et 27%. En revanche pour le sol peu pollué (P2), ils sont de 15, 55 et 30% respectivement, et pour le sol non pollué (P3), ces taux sont respectivement de 28, 37 et 35%.



**Figure 17** : composition granulométrique des sols étudiés d'A.E.H

La projection de ces résultats sur le triangle textural de l'U.S.D.A 1986, qui consiste à reporter la valeur de chacun des trois pourcentages sur l'axe qui lui correspond et tracer une parallèle à l'axe précédent, la zone d'intersection des trois tracés indique la nature de l'échantillon testé. Cette méthode montre que le sol pollué (P1) est limoneux-fine, le sol peu pollué (P2) est limoneux et le sol non pollué (P3) est limono-argileux (Figure 18).



**Figure 18 :** Résultats de la projection de la composition granulométrique des sols de la station-service d'A.E.H sur le triangle de texture de l'USDA (1986).

**P1 :** Sol pollué ;

**B :** Sol peu pollué ;

**C :** Sol non pollué

- Station-service de Larbaa Nath Irathen

Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons prélevés dans la station de Larbaa Nath Irathen sont illustrés par la figure 19.

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 (P3), les taux en argile sont élevés par rapport aux autres sols (P1 et P2) avec une valeur de 50%.

Dans les sols peu pollués (P2) et les sols pollués (P1), le taux de limon est élevé par rapport au sol (P3) avec des valeurs de 61,40% pour P2 et 41,55% pour P1.

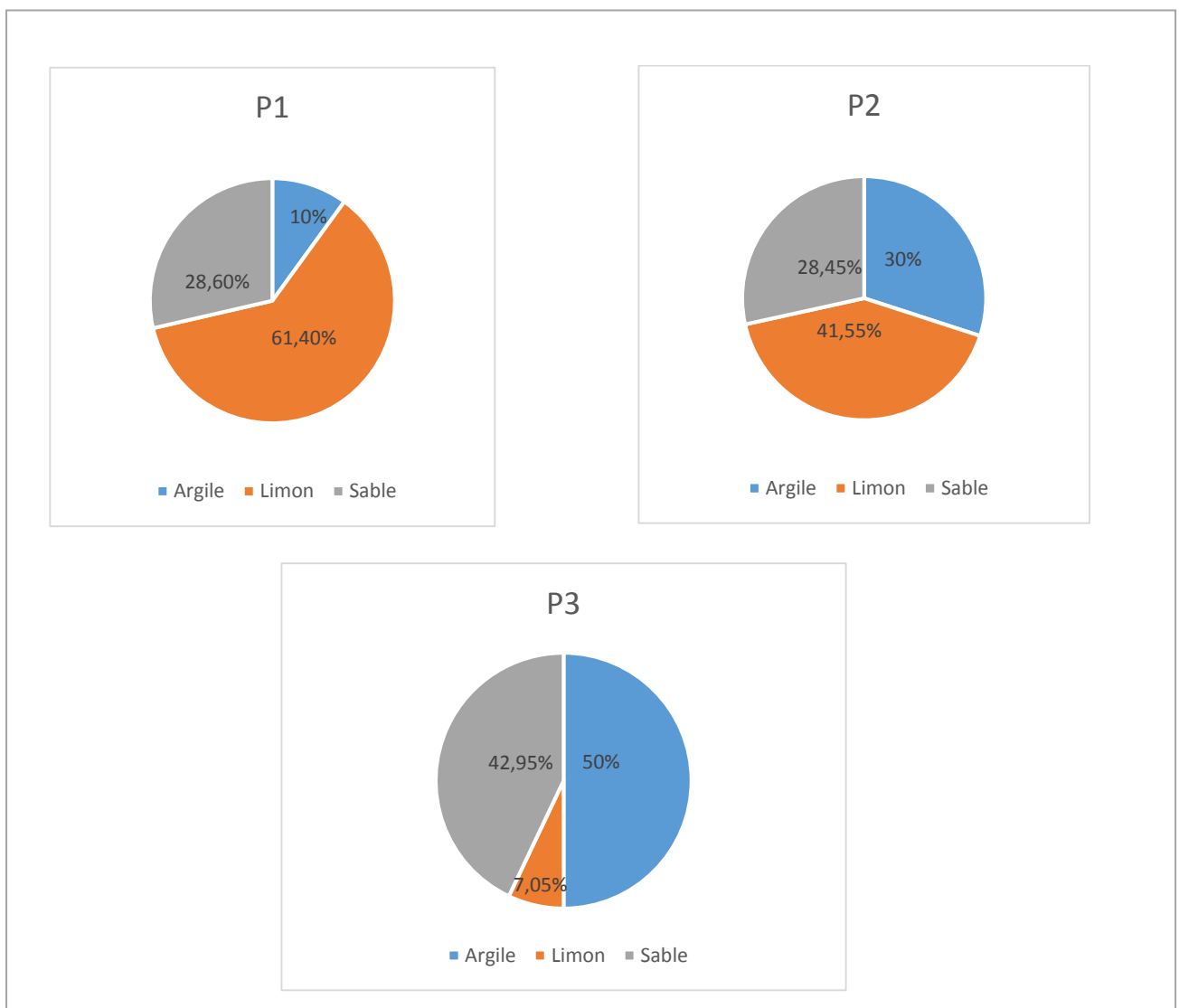


Figure 19 : Composition granulométrique des sols étudiés de LNI.

D'après les résultats obtenus de la projection des taux de limon, sable et argile des différents sols, échantillonnés à Larbaa Nath Irathen, sur le triangle de texture USDA. Le sol pollué (P1) est limoneux fin, le sol peu pollué (P2) est limono-argileux et le sol non pollué (P3) est argileux (figure 20).

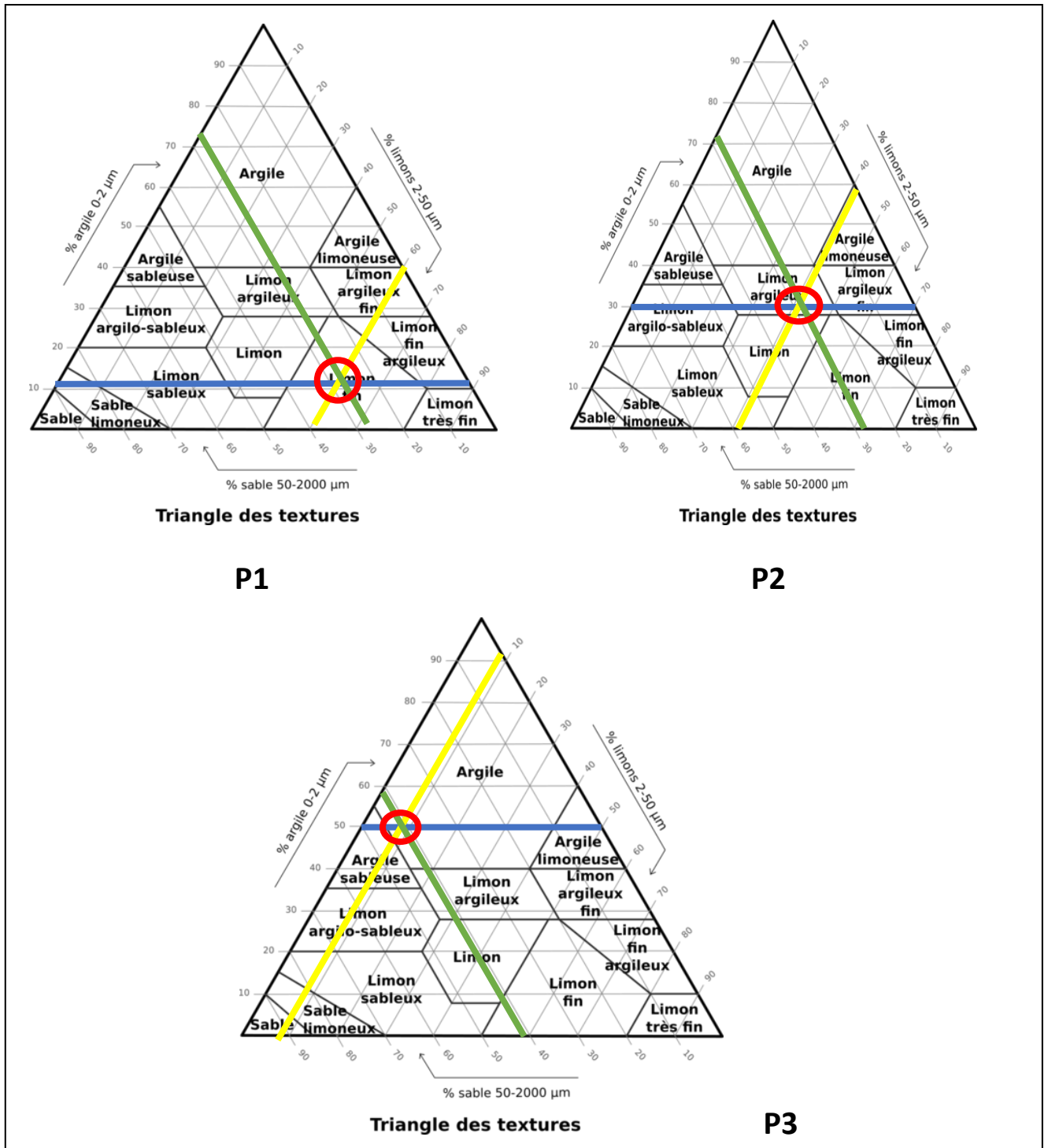


Figure 20 : Résultats de la projection de la composition granulométrique des sols de la station-service de L.N.I sur le triangle de texture de l'USDA (1986).

**P1** : Sol pollué ;

**P2** : Sol peu pollué ;

**P3** : Sol non pollué

## II. Discussion

Les pH des trois sols (P1, P2 et P3) provenant des deux stations-service indiquent un milieu neutre. Cependant, nous avons observé que le pH tend à diminuer suivant le gradient de pollution. Ce résultat est cohérent avec l'étude de Chikhaoui et Hettak (2019), qui a montré que le pH est plus faible dans les sols éloignés d'une source de pollution par rapport à ceux qui en sont proches.

La conductivité électrique est une mesure qui permet d'estimer la concentration des sels solubles présents dans un échantillon. L'analyse de la CE des sols prélevés dans les deux stations-service révèle que tous les échantillons sont non salés, ce qui est en accord avec les normes établies par **Baize (2000)**.

Les analyses du calcaire total sur les sols étudiés révèlent une relation inverse : le taux de calcaire diminue avec l'augmentation de la concentration en hydrocarbures. La plus forte teneur en calcaire se trouve dans le sol P3 des deux stations-service, tandis que la plus faible est mesurée dans le sol P1.

**Godwin et al. (2013)** attestent que le taux de carbone organique augmente dans les sols pollués. Les résultats que nous avons obtenus affirment aussi que le taux de carbone organique est plus élevé dans les sols pollués par rapport aux sols moins pollués.

Les analyses du carbone organique révèlent que le sol P1 des deux stations-service présente une teneur plus élevée que les sols P2 et P3. Cette différence est due à l'introduction d'hydrocarbures par les rejets de la station-service. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Godwin et al. (2013), qui ont démontré une augmentation du taux de carbone dans les sols pollués par rapport aux sols témoins. Cette augmentation est expliquée par l'activité des micro-organismes qui décomposent les hydrocarbures, libérant ainsi du carbone dans le sol.

D'après la comparaison des sols P1 et P2 des deux stations, le P3 des deux stations présente la valeur la plus faible en matière organique, tandis que la valeur maximale est enregistrée au niveau du P1 des deux stations, ce qui indique qu'elle augmente avec l'augmentation de la teneur en hydrocarbures du sol.

Selon **(Fayuelle, 2013)**, il existe une relation complexe entre la présence de contamination en hydrocarbures et les niveaux de matières organiques dans les sols.

L'analyse des sels solubles a révélé que leur concentration augmente en fonction du gradient de pollution, c'est-à-dire en s'approchant de la source de contamination. Cette observation converge avec les travaux de **Lamiri et Nezlioui (2017)**, qui ont également mis en évidence une corrélation positive entre la teneur en sels solubles et le gradient de pollution.

Les mesures de l'humidité des sols indiquent que le sol P1, provenant des deux stations-service, a un taux d'humidité inférieur à celui des sols P2 et P3. Ces résultats concordent avec les travaux de Chikhaoui et Hettak (2019), qui ont constaté que le taux d'humidité est plus élevé dans les couches de sol non contaminées.

Selon **(Fccendini,1995)**, le taux élevé d'humidité joue un rôle important dans la solubilisation d'une large gamme de polluants. Le taux important de l'humidité dans les sols très pollués est causé par la faible perméabilité de ces sols **(Guy,1978)**.

Par ailleurs, les sols des sites P1, P2 et P3 de la station-service AEH se caractérisent par une teneur élevée en limon. Ils sont donc classés comme des sols limoneux.

À la station-service de LNI, les sols des sites P1 et P2 présentent également une proportion élevée de limon, ce qui les qualifie de sols limoneux. En revanche, le sol de site P3 se distingue par une teneur en argile plus élevée, le classant ainsi comme un sol argileux.

# **Conclusion et perspectives**

Ce travail vise spécifiquement à analyser les caractéristiques physiques et chimiques du sol autour de deux stations-services situées à Ain El Hammam et Larbaa Nath Irathen.

Suite à notre étude, les résultats démontrent clairement que la présence d'hydrocarbures entraîne une modification significative des propriétés physico-chimiques du sol analysé.

Nos observations révèlent que les sols contaminés par les hydrocarbures présentent un faible taux d'humidité. Cette constatation suggère que la présence d'hydrocarbures altère la capacité du sol à retenir l'eau.

Concernant le Ph, les valeurs enregistrées indiquent un pH neutre pour les trois sols P1, P2 et P3 des deux stations.

La teneur en calcaire du sol diminue progressivement à mesure que l'on s'approche du point de contamination. Cette tendance suggère que la dissolution du calcaire est provoquée par la pollution, ce qui confère au sol une nature modérément calcaire dans les zones proches de la source de pollution.

La présence de sels solubles tels que les bicarbonates et les chlorures augmente à mesure que l'on se rapproche de la source de pollution.

La concentration en carbone organique et en matière organique est significativement plus élevée dans les sols contaminés par rapport aux sols non contaminés.

Cette étude met en évidence l'impact significatif de la contamination par les hydrocarbures sur les propriétés physico-chimiques des sols des stations-services. Nos résultats ont clairement démontré une altération des paramètres tels que le carbone organique, pH... Ces modifications, observées principalement au niveau des zones de pollution, confirment la nécessité d'une gestion proactive des sites à risque.

De ce fait, il serait aussi très intéressant, d'introduire des méthodes de quantification des hydrocarbures moins onéreuses. Ces méthodes existent, et leur mise en place est très facile et permettent même de quantifier les teneurs en hydrocarbures sur le site même de l'étude. Nous pensons notamment aux méthodes proposées par la marque Petroflag.

Il serait également intéressant d'étudier l'emplacement du réseau de distribution de produits pétroliers et de concevoir des cartes pour répertorier les sites contaminés de faible

à forte contamination au niveau de la station-service où une décontamination est nécessaire.

# **Références bibliographique**

## Références bibliographique

---

- 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, 135 p.
- Archambault P., Schloss IR., Grant C., Plante S. 2017. Les hydrocarbures dans le golfe du Saint-Laurent - Enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Notre Golfe, Rimouski, Qc, Canada, 324 p.
- BAIZE D. 2000. Guide des analyses en pédologie. 2e Ed. Tech et pratique INRA Edition. Paris. 412 p.
- Baize D. 1989. Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris. 172 p.
- Baize et Jabiol 1995. Guide pour la description des sols. Ed. INRA, Paris. 375 p.
- Boudouch O. 2009. Étude de dépollution des sols par extraction sous pression réduite. Application au traitement des composés organique volatiles. Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Lyon. 50-53 p.
- Brady, N.C., Weil, R.R. 2008. The nature and properties of soils. 14th Edition, Pearson Prentice Hall, London, United Kingdom.
- Calvet R. 2003. Le Sol, Propriété et fonction. Tome 1. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Editions France Agricole. DUNOD.
- Calvet R. .2003. Le Sol Propriétés Et Fonctions. Tome 1. France Agricole DUNOD, 455 p.
- Calvet R. 2013. Le sol. Tome 2, Edition France Agricole. 678 p.
- Clement M., Pieltain F. 2003. Analyse chimique méthode choisies. Ed. TEC & DOC. 382 p.
- Colin F. 2000. Pollution localisées des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Edition TEC et DOC. 417 p.
- Dewis J., Freitas F. (1984). Méthodes d'analyse physique et chimique des sols et des eaux. Paris, 280 p.
- Fayeuille A. 2013. Etude des mécanismes intervenant dans la biodégradation des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques par les champignons saprotrophes telluriques en vue d'applications en bioremédiation fongique de sols pollués. Thèse de Doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, France, 204 p.

- Fingas, M. 2011. Oil Spill Science and Technology, 1st Edition. Gulf Professional Publishing, États-Unis, 1192 p.
- Fingas, M. 2013. The Basics of Oil Spill Cleanup. CRC Press, États-Unis.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. 2010. Le sol vivant. Bases de pédologie - Biologie des sols. 3e édition revue et augmentée. Science de la terre. Presses polytechniques et universitaires romandes. 820 p.
- Godwin U., Akpan, Bassey T., & Udoh. 2013. Evaluation of some properties of soils affected by diesel oil pollution in Uyo, Niger Delta area, Nigeria. Journal of Biology, Agriculture and Healthcare: 33–43.
- Koller E. 2004. Traitement des pollutions industrielles (eau, air, déchets, sols, boues). Edition DUNOD, Paris. 424 p.
- Lamiri F., Nezlouli H. (2017). Mémoire de Master en protection de l'environnement, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. 63 p.
- Legros J.P. 2007. Les Grands Sols Du Monde. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, 574 p.
- Mermoud A. 2006. Cours de physique du sol. Généralité, École polytechnique fédérale de Lausanne, pp. 12.
- Morgan P., Watkinson R.J. 1994. Biodegradation of components of petroleum. Biochemistry of Microbial Degradation. Vol.2, N°1: 1–31.
- Patej S., Roux P., Gaston D. 2002. Etude de scénarios dangereux en stations-service. INERIS, 35 p.
- Paul E.A., Clark F.E. 1996. Soil Microbiology and Biochemistry. 2nd edition. Academic Press, San Diego, California (USA), 340 p.
- PREVOST G. 2006. La pierre sculptée, 640 p.
- Prince R., Grossman J. 2003. Townsend: the role of phytoxydation and biodegradation in long term weathering of crude and heavy fuel oils. Spill Science & Technology Bulletin, vol. 8: 145–156.
- Quénéa K. 2004. Étude structurale et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sol d'une chronoséquence forêt/maïs (Cestas, Sud-ouest de la France).

## Références bibliographique

---

- Riviere J.L. 1998. Évaluation du risque écologique des sols pollués. Lavoisier Tec & Doc. 193 p.
- Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M., Pennock D. 2018. Soil Pollution: A Hidden Reality. FAO.
- Ruellan A., Poss R. (2008). Les sols pour l'avenir de la planète Terre, Avenue de la pomme de pin\_BP 20619. 15 p.
- Sayyad G., Afyun M., Mousavi S.-F., Abbaspour K.C., Richards B.K., Schulin R. 2010. Transport of Cd, Cu, Pb and Zn in a calcareous soil under wheat and safflower cultivation – a column study. *Geoderma*, vol. 154: 311–320.
- Soltani M. 2004. Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram–négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de Doctorat, Chimie Analytique, Université de Paris 6. 284 p.
- Sparks D.L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. New York: Academic Press, 267 p.
- Sposito G. 1997. *The Chemical Composition of Soils. The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York: 3–27.
- Swartjes F.A. 2011. *Dealing with Contaminated Sites*. Dordrecht, Springer Netherlands.
- Varjani S.J., Upasani V.N. 2017. A new look on factor affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 120: 71–83.

# **Annexes**

**Annexes 1 : les normes d'interprétations**

pH (SSDS, 1993)

Fortement acide	Acide	Légèrement acide	Neutre	Légèrement alcalin	Alcalin
< 5,0	5,0 – 6,0	6,0 – 6,6	6,6 – 7,4	7,4 – 7,8	>7,8

Conductivité électrique (SSDS, 1993)

Non-salin	Salinité très faible	Salinité faible	Salinité modérée	Salinité élevée
0 – 2	2 - 4	4 - 8	8 – 16	≥ 16

Calcaire total (Baize, 1998)

Non calcaire	Peu calcaire	Modérément calcaire	Fortement calcaire	Très fortement calcaire
≤ 1	1%- 5	5% - 25	25%- 50	50% - 80

Carbone organique (Hazelton et Murphy, 2007)

Extrêmement faible	Très faible	Faible	Modéré	Elevé	Très élevé
< 0,4	0,4 – 0,6	0,6 - 1	1 – 1,8	1,8 – 3	>3

Matière organique (Hazelton et Murphy, 2007)

Extrêmement faible	Très faible	Faible	Modéré	Elevé	Très élevé
<0,7	0,70 – 1,00	1,00 – 1,70	1,70 – 3,00	3,00 – 5,15	>5,15

## Annexes 2 : Résultats des analyses

**Tableau 01** : résultats d'analyses du pH

Sol Stations	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	7,70	7,22	7,67	7,72	7,65	6,62
R2	7,69	7,82	7,62	7,71	7,63	8,49
R3	7,71	8,43	7,67	7,73	7,62	7,65
<b>Moyenne</b>	<b>7,7</b>	<b>7,82</b>	<b>7,65</b>	<b>7,72</b>	<b>7,63</b>	<b>7,58</b>

**Tableau 02** : Résultats d'analyses de l'humidité (%)

Sol Stations	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	4,90	4,93	4,93	4,92	4,95	4,91
R2	4,87	4,80	4,94	4,95	4,94	4,88
R3	4,83	4,94	4,91	4,94	4,95	4,96
<b>Moyenne</b>	<b>4,86</b>	<b>4,89</b>	<b>4,92</b>	<b>4,93</b>	<b>4,94</b>	<b>4,91</b>

**Tableau 03** : Résultats d'analyse de la conductivité électrique (ms/cm)

Sol Stations	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	0,35	0,39	0,31	0,24	0,30	0,23
R2	0,34	0,37	0,33	0,26	0,32	0,24
R3	0,35	0,38	0,33	0,27	0,31	0,24
<b>Moyenne</b>	<b>0,34</b>	<b>0,38</b>	<b>0,32</b>	<b>0,25</b>	<b>0,31</b>	<b>0,23</b>

**Tableau 04** : Résultats d'analyse du Calcaire total (%)

Sol Stations	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	5,2	7,4	7,1	8,1	8,6	8,2
R2	7,8	8,5	8,5	9	9	10
R3	5,4	5	5,7	6,5	6,5	7,8
<b>Moyenne</b>	<b>6,23</b>	<b>6,96</b>	<b>7,1</b>	<b>7,86</b>	<b>8,03</b>	<b>8,66</b>

**Tableau 05** : Résultats d'analyses du carbone totale (%)

Sol Stations	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	2,33	1,96	1,47	1,35	1,10	1,23
R2	2,21	1,59	1,35	1,35	1,10	1,23
R3	2,09	1,10	1,10	1,59	1,23	1,10
<b>Moyenne</b>	<b>2,21</b>	<b>1,55</b>	<b>1,30</b>	<b>1,43</b>	<b>1,14</b>	<b>1,18</b>

**Tableau 06** : Résultats d'analyses de la matière organique (%)

Sol Station	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	4,01	3,37	2,53	2,32	1,89	2,12
R2	3,81	2,74	2,32	2,32	1,89	2,12
R3	3,60	1,89	1,89	2,74	2,12	1,89
<b>Moyenne</b>	<b>3,80</b>	<b>2,66</b>	<b>2,24</b>	<b>2,46</b>	<b>1,96</b>	<b>2,04</b>

**Tableau 07** : Résultats d'analyses des sels solubles**Bicarbonates (Meq/l)**

Sol stations	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	4,1	4,22	3	3,2	1	1,12
R2	3,98	4,24	2,79	3,2	2	1,17
R3	4,11	4,23	2,99	3,1	2,2	1,20
<b>Moyenne</b>	<b>4,06</b>	<b>4,23</b>	<b>2,92</b>	<b>3,1</b>	<b>1,73</b>	<b>1,16</b>

**Chlorures (Meq/l)**

Sol Statons	P1		P2		P3	
	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I	A.E.H	L.N.I
R1	1,8	1,68	1,1	1,3	0,3	0,6
R2	1,4	1,68	1,1	1,33	0,6	0,62
R3	2	1,67	1	1,24	0,4	0,5
<b>Moyenne</b>	<b>1,73</b>	<b>1,67</b>	<b>1,06</b>	<b>1,29</b>	<b>0,43</b>	<b>0,57</b>

**Annexes 3** : Résultats des analyses statistiques avec le logiciel R.

- Résultats du test Kruskal-Wallis pour la variable pH

```
> kruskal.test(pH~inter)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  pH by inter
Kruskal-Wallis chi-squared = 6.2599, df = 7, p-value = 0.5097
```

- Résultats du test Kruskal-Wallis pour la variable CE

```
      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  CE by région
Kruskal-Wallis chi-squared = 1.9318, df = 1, p-value = 0.1646
```

- Résultats du test d'ANOVA pour la variable calcaire

```
Analysis of Variance Table

Response: cal
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
inter    7 12.999   1.8570  1.0948 0.4116
Residuals 16 27.141   1.6963
```

- Résultats du test Kruskal-Wallis pour la variable carbone organique

```
> kruskal.test(C~inter)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  C by inter
Kruskal-Wallis chi-squared = 12.023, df = 7, p-value = 0.09979
```

- Résultats du test Kruskal-Wallis pour la variable matière organique

```
> kruskal.test(MO~inter)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  MO by inter
Kruskal-Wallis chi-squared = 12.211, df = 7, p-value = 0.09384
```

- Résultats du test de Kruskal-Wallis pour la variable bicarbonate

```
> kruskal.test(bicarbonates~inter)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data: bicarbonates by inter
Kruskal-Wallis chi-squared = 16.692, df = 7, p-value = 0.0195
```

- Résultats du test de Newman et Kuels pour la variable bicarbonate

```
$groups
 bicarbonates groups
P1    20.58333      a
P2    12.75000      b
T     12.16667      b
P3     4.50000      c
```

- Résultats du test de Kruskal-Wallis pour la variable chlorures

```
> kruskal.test(chlorures~prélèvement)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data: chlorures by prélèvement
Kruskal-Wallis chi-squared = 15.255, df = 3, p-value = 0.001611
```

- Résultats du test de Newman et Kuels pour la variable chlorures

```
$groups
 chlorures groups
P1 20.583333      a
P2 12.666667      b
T  12.083333      b
P3  4.666667      c
```

- Résultats du test de Kruskal-Wallis pour la variable humidité

```
> kruskal.test(H~inter)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data: H by inter
Kruskal-Wallis chi-squared = 10.325, df = 7, p-value = 0.1709
```

## **Résumé**

L'objectif de ce travail est d'étudier les propriétés physiques et chimiques des sols contaminés par les hydrocarbures, en prenant pour cas d'étude des sols situés à proximité de stations-service. Des échantillons ont été prélevés dans deux stations-service localisées respectivement à Ain El Hammam et à Larbaa Nath Irathen. Les paramètres analysés incluent le pH, la conductivité électrique, la teneur en calcaire total, le carbone organique, la matière organique, les sels solubles (carbonates, bicarbonates, chlorures), l'humidité ainsi que la granulométrie.

Les résultats obtenus montrent que les hydrocarbures présents dans les deux stations ont un impact significatif sur les caractéristiques physico-chimiques du sol. Cet impact se manifeste par une diminution progressive de certains paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, le carbone organique et la matière organique, à mesure que l'on s'éloigne de la source de pollution. En parallèle, une augmentation d'autres paramètres, notamment, les carbonates, les chlorures et l'humidité, a été observée.

**Mots clés :** station-service, hydrocarbures, sol, paramètres physico-chimiques, pollution

## **Abstract**

The objective of this work is to study of the physical and chemical properties of hydrocarbon-contaminated soils, using soils located near gas stations as a case study. Samples were taken from two gas stations located in Ain El Hamma and Larbaa Nath Irathen, respectively. The parameters analyzed include pH, electrical conductivity, total limestone content, organic carbon, organic matter, soluble salts (carbonates, bicarbonates, chlorides), moisture content, and particle size.

The results show that the hydrocarbons present in both stations have a significant impact on the physicochemical characteristics of the soil. This impact is manifested by a progressive decrease in certain parameters such as pH, electrical conductivity, organic carbon, and organic matter, with increasing distance from the pollution source. At the same time, an increase in other parameters, notably carbonates, chlorides, and moisture content, was observed.

**KeyWords :** gas station, hydrocarbons, soil, physicochemical parameters, pollution