

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département de Biologie



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master
en Ecologie et Environnement
Spécialité : Biodiversité et Environnement
Thème

Caractéristiques physico-chimiques d'un sol pollué
par les hydrocarbures
Cas de la station-service de Makouda

Présenté et soutenu publiquement le :21 /09/ 2022

Par :

M^{elle} LACHEMOT Dihia

M^{elle} LAMRANI Sabrina

Devant le jury composé de :

Présidente: M^{me} Chibane G.

MAA

UMMTO

Promotrice : M^{me} Sadoudi - Ali Ahmed D.

Professeur

UMMTO

Co-promotrice : M^{me} Lamri T.

MAA

UMMTO

Examinatrice: M^{me} Sahmoune F.

MAA

UMMTO

Année universitaire : 2021 – 2022

Remerciements

Au terme de ce mémoire de fin d'études, nos remerciements vont à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont collaboré à sa réalisation, ainsi que ceux qui ont accepté de le juger.

Nous remercions en particulier, notre promotrice **M^{me} SADOUDI-ALI AHMED Djamila** tout d'abord pour nous avoir proposé cette intéressante thématique et nous avoir encadré durant ce travail. Nous adressons toute notre gratitude et notre profonde reconnaissance pour nous avoir fait bénéficier de son savoir et de son expérience scientifiques, avec tant de passion et de pédagogie pour ses conseils avisés et ses remarques toujours constructives sur notre travail.

Nous témoignons notre profonde gratitude à notre Co-Promotrice, **M^{me} LAMRI Taous**, dont les conseils, la confiance et la patience constituent une contribution considérable sans laquelle ce travail n'aurait pas atteint le bon port. Puisse-t-elle trouver un grand respect pour son aide dans ce travail.

Nous remercions vivement les membres de jury **M^{me} CHIBANE Gouraya** et **M^{me} SAHMOUNE Fadhila** pour le privilège qu'ils nous font, de l'intérêt porté à notre thématique et d'avoir accepté de présider et d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs recommandations.

Nous tenons également à remercier chaleureusement l'ensemble du personnel du laboratoire de pédologie du département de biologie et agronomie ainsi que celui du laboratoire commun pour leur accueil, leur aide et leurs bonnes explications.

Nos vifs remerciements vont aussi au chef de département de chimie **M^{me} AYATI** pour nous avoir permis l'accès au laboratoires de chimie pour effectuer certaines analyses.

Enfin, un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, mon mari source de tendresse et de force

Je vous remercie d'être toujours à mes côtés, de me soutenir, de m'aimer et me protéger.

A mes chers frères et sœurs

A ma belle famille

A mon binôme et sa famille

A mes amis (es)

A toute la promotion de Biodiversité et Environnement 2021/2022

Dihia

Dédicaces

A mes très chers parents, source de tendresse et de force

Je vous remercie d'être toujours à mes côtés, de me soutenir, de m'aimer et me protéger.

A mon frère et ma sœur tant aimés,

A la mémoire de mon grand-père,

A mon chat Titi,

A toutes les personnes que je porte dans le cœur,

A mon binôme et sa famille,

A toute la promotion de Biodiversité et Environnement 2021/2022

Je vous dédie ce modeste travail car vous m'êtes si chers

Sabrina

Liste des abréviations

CE : Conductivité électrique.

mPa.s: millipascal-seconde (unité de la viscosité)

g/cm³: Gramme par centimeter cube (unité de la densité)

GES: Gaz à effet de serre

HC: Hydrocarbures.

MO: Matière organique.

SP₁ : Sol du point 1 (Le plus proche de la source de pollution)

SP₂ : Sol du point 2 (Situé entre le point 1 et le point 2)

SP₃ : Sol du point 3 (Le plus écarté de la source de pollution)

Listes des figures

Figure 1: Localisation par satellite du site d'étude de Makouda (Google Maps, 2022)	13
Figure 2 : Test du bocal pour déterminer la texture	15
Figure 3 : Béchiers portés sur bain de sable	17
Figure 4 : Composition granulométrique des sols étudiés	20
Figure 5 : Taux d'humidité des sols étudiés	21
Figure 6 : pH des sols étudiés	22
Figure 7 : Conductivité électrique des sols étudiés	23
Figure 8 : Variation du calcaire total dans les sols étudiés.....	24
Figure 9 : Taux de bicarbonates des sols étudiés	25
Figure 10 : Taux de chlorures des sols étudiés	26
Figure 11 : Taux de carbone organique des sols étudiés	27
Figure 12 : Taux de la matière organique des sols étudiés.....	28
Figure 13 : Graphe ACP (Variables) pour les paramètres physicochimiques des sols étudiés	29
Figure 14 : Graphe ACP (Individus) pour les paramètres physicochimiques des sols étudiés	30

Liste des tableaux

Tableau 1: Résumé des techniques de bioremédiation (Vidali, 2001)	11
---	----

Table des matières

Résumé	
Introduction générale	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I. Généralités sur le sol.....	3
Définition du sol	3
II. Hydrocarbures	5
Définition des hydrocarbures	5
III. Sol pollué par un hydrocarbure.....	8
Définition de la pollution.....	8
IV. Techniques de traitement des sols contaminés par les hydrocarbures.....	10
Techniques physiques	10
Techniques chimiques.....	10
Techniques thermiques.....	10
Techniques biologiques.....	11
Chapitre II : Matériel et méthodes	
1. Présentation de la zone d'étude	13
2. Stratégie de prélèvement	14
4. Analyses effectuées	14
Détermination de la texture	14
Mesure du pH.....	15
Détermination de la conductivité électrique (CE).....	15
Dosage du calcaire total	16
Dosage des anions	17
Dosage du carbone organique.....	17
Dosage de la matière organique.....	18
5. Analyses statistiques	19
Chapitre III : Résultats et discussion	
I. Résultats	20
Effet des hydrocarbures sur le sol	20
Granulométrie.....	20
I. 1.2.Humidité	21

I. 1.3.Potentiel d'Hydrogène	22
I. 1.4.conductivité électrique (CE).....	23
I. 1.5.Calcaire total	24
I. 1.6.Sels solubles.....	25
I. 1.7.Carbone organique	27
I. 1.8.Matière organique	28
Analyse en composantes principales (ACP).....	29
II. Discussion	31
Conclusion et perspectives	34
Références bibliographiques	
Annexes	

Introduction

générale

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

Le secteur des hydrocarbures est, par excellence, le pilier de l'économie algérienne puisque l'Algérie possède environ 1 % des réserves mondiales de pétrole et 3 % de gaz (**Chabane, 2010**). Cette énergie apporte au pays et à ses citoyens des bienfaits tout en causant de sérieuses menaces sur l'environnement, en général, et sur le sol en particulier.

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, ainsi, comme un habitat pour de nombreux microorganismes (**Battaz, 2009**). Il doit être protégé vu qu'il constitue l'un des principaux points de fuite environnementale des produits pétroliers (**Gabet, 2004**).

Les techniques de réhabilitation des sols pollués reposent généralement sur des processus physico-chimiques qui sont très onéreux et peuvent entraîner des pollutions supplémentaires. D'où l'intérêt porté, ces dernières années, à la remédiation biologique.

Selon le degré de pollution des sols et du risque qu'ils représentent directement pour la santé humaine et les écosystèmes, des techniques particulières de dépollution doivent être mises en œuvre et de nombreux paramètres sont à prendre en considération: type de polluant, contamination récente ou ancienne, extension en surface ou dans les couches profondes du sol et diversité des conditions locales. Tout ceci nécessite un diagnostic préalable (**Benchouk, 2017**).

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.

Lors de cette recherche, nous nous sommes intéressées à la caractérisation physique et chimique du sol de la station-service de Makouda située à 19 km de la wilaya de Tizi-Ouzou. Nous avons retenu trois points de prélèvement, le premier se situe à l'intérieur de la station, le deuxième à 20 m du point de rejet et le troisième est le plus loin de la source de pollution.

Le présent travail est structuré comme suit :

- Une première partie qui consistera en une analyse bibliographique avec des généralités sur le sol et sa pollution par les hydrocarbures et les impacts de ces derniers sur l'environnement.
- Une seconde consacrée aux investigations sur le terrain et diverses expérimentations au niveau du

laboratoire, notamment les descriptions et présentation du site d'étude, du matériel et des méthodes utilisés.

- Une troisième partie est consacrée pour la présentation des résultats obtenus, leur interprétation et leur discussion.
- Enfin, une conclusion générale et quelques perspectives de recherche viendront pour clôturer ce travail.

Synthèse

bibliographique

I. Généralités sur le sol

Le sol constitue un compartiment essentiel des écosystèmes en raison de multiples phénomènes dont il est le siège. Ces phénomènes irréversibles sont à l'origine de la fonction environnementale ou encore de la fonction écologique du sol (**Calvet, 2013**).

Définition du sol

Le sol est une partie de l'écosystème qui occupe une position clé dans les cycles globaux des matières. Il représente la couche superficielle de l'écorce terrestre résultant de l'altération de la roche mère en petits fragments sous différentes actions (**Aragno et Matthey, 2010**).

Phases du sol

I.2.1-Fraction solide

Elle comporte les minéraux classés par catégorie de grosseur et les substances organiques inertes, mais aussi les êtres vivants (**Ravelojaona et al., 2020**).

I.2.2-Fraction liquide

C'est une eau contenant des substances solubles variées et complexes, formant ce qu'on appelle la solution du sol (**Ravelojaona et al., 2020**).

I.2.3-Fraction gazeuse

Encore appelée atmosphère du sol, sa composition est généralement proche de celle de l'air (oxygène, azote et gaz carbonique), mais elle peut être variable dans l'espace et dans le temps (**Calvet, 2003**).

Propriétés du sol

I.3.1.Propriétés physiques du sol

I.3.1.1.Structure du sol

C'est le mode d'arrangement spatial des constituants solides (minéraux et organiques). Selon la présence ou l'absence des agrégats, différents types de structures sont distinguées : structure élémentaire, fragmentaire et compacte (**Duchauffour et al., 2018**).

Texture du sol

Elle définit une proportion relative des différentes fractions (sable, limon, argile) dans un substrat (**Calvet, 2013**).

Perméabilité du sol

C'est l'aptitude du sol à se laisser traverser par un fluide sous l'action d'un gradient hydraulique (**Rodrigo et Dos Santos, 2021**).

Porosité du sol

C'est le rapport du volume des espaces vides remplis d'air et d'eau au volume total du sol, exprimée en pourcentage (**Duchauffour et al., 2018**).

Propriétés chimiques du sol

I.3.2.1.pH du sol

C'est une grandeur physique sans unité qui varie de 0 à 14 et qui indique 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**).

Matière organique

C'est un matériau hétérogène provenant de la décomposition de la matière d'origine végétale, animale et bactérienne (**Paradis, 2016**). Elle sert de nourriture et de milieu de vie à la flore et à la faune du sol (**Pärnpuu et al., 2022**).

Elle est en constante évolution dans le sol et est transformée par divers processus géochimiques à travers le temps (**Paradis, 2016**).

Humidité

C'est un paramètre considérable de l'environnement, représentant la quantité d'eau qu'un sol, non saturé, accumule. Elle renseigne sur la disponibilité d'eau indispensable à la croissance de la végétation (**Jonard et al., 2018**).

Conductivité électrique

C'est la quantité totale en sels solubles correspondant à la salinité globale du sol. Elle dépend de la teneur et de la nature des sels solubles présents dans ce sol (**Koller, 2004**).

Calcaire total

C'est la quantité de calcaire sous forme de carbonates, dosé par la destruction à l'acide chlorhydrique. Selon **Es-skalli (2015)**, la détermination du carbonate de chaux total permet une classification des sols en différentes catégories : sols non calcaire, calcaires, franchement calcaires.

Propriétés biologiques du sol

Le sol constitue le principal réservoir de la biodiversité puisqu'il héberge environ un quart de la diversité biologique totale de la planète classée selon plusieurs échelles de taille allant des micro-organismes jusqu'aux macro-organismes; tels que les bactéries, les archéobactéries, les algues, les cryptogames, les phanérogames, les champignons, les nématodes, les rotifères, les arthropodes, les annélides et les mollusques. Ils sont tous liés dans les réseaux d'interactions et participent au flux d'énergie dans les écosystèmes.

Les différentes caractéristiques de ces organismes (formes, stades de développement, modes de vie et régimes alimentaires) influencent le fonctionnement physico-chimique du sol à toutes les échelles (de l'échelle texturale à l'échelle structurale) (**Hedde et Zwicke, 2020**).

II. Hydrocarbures

Définition des hydrocarbures

Un hydrocarbure est un composé organique contenant exclusivement des atomes de Carbone (C) et d'Hydrogène (H). Il possède en conséquence une formule brute de type C_nH_m . Trois (03) séries d'hydrocarbures sont distinguées : La série des hydrocarbures saturés, la série des insaturés et celle des aromatiques (**Picot et Montadon, 2013**).

Classification des hydrocarbures

II.2.1. Hydrocarbures saturés

Ce sont des hydrocarbures qui présentent de simples liaisons entre les atomes de carbone. On les appelle saturés parce qu'ils ne peuvent pas fixer d'éléments supplémentaires à ceux qui constituent leur molécule (Kenneth et al., 2015).

II.2.2. Hydrocarbures insaturés

Ce sont ceux qui possèdent au moins une double ou une triple liaison Carbone-Carbone (Picot et Montadon, 2013).

II.2.3. Hydrocarbures aromatiques

Ils sont composés, d'au moins, un cycle benzénique dans leur molécule (Kenneth et al., 2015).

Propriétés physiques des hydrocarbures

II.3.1. Viscosité

Elle est représentée par la résistance à l'écoulement : Cela veut dire que les hydrocarbures à haute viscosité s'écoulent difficilement, par contre ceux du cas inverse sont très fluides. Elle dépend de la température et s'exprime en (mPa.s) (Archambault et al., 2017).

II-3.2. Densité

C'est la mesure de la masse par rapport au volume, elle s'exprime en « g/cm^3 ». Cette propriété est utilisée par l'industrie pétrolière pour distinguer les hydrocarbures légers des lourds. Elle est peu ou pas influencée par la température (Archambault et al., 2017).

II-3.3. Point d'écoulement

C'est la température en dessous de laquelle un hydrocarbure ne s'écoule plus. Si la température ambiante est inférieure à son point d'écoulement, le produit se comporte comme un solide (Gruyer et al., 2015).

Devenir des hydrocarbures

Volatilisation

Elle débute après un déversement d'hydrocarbures, et correspond au transfert des composés volatils plus légers vers l'atmosphère (Neff et al., 2000).

Emulsification

C'est un processus d'incorporation de gouttelettes d'eau dans les hydrocarbures pétroliers. Ceci augmente le volume du produit déversé et modifie certaines propriétés physiques des hydrocarbures (la densité et la viscosité) (Gruyer et al., 2015).

Transformation

Il peut s'agir d'un phénomène biologique lorsqu'elle fait intervenir les microorganismes ou non biologique (hydrolyse, oxydation et réaction photochimique) (Ali Ahmed, 2011).

Solubilisation

Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée. Il est important de noter que les hydrocarbures solubles sont parmi les plus dangereux pour l'environnement. Ils sont difficiles à éliminer et sont adsorbés par la faune et la flore du sol (Larbi, 2018).

Sorption

C'est un phénomène physicochimique par lequel une molécule adhère à la surface d'un matériau solide ou s'incorpore dans son volume (Duchaufour et al., 2018).

Impact des hydrocarbures sur l'environnement et la santé humaine

Les hydrocarbures sont une source d'énergie que le particulier et le consommateur utilisent journalièrement dans le monde entier. Leur rejet provoque une pollution engendrant des changements tels qu'une hausse croissante des températures moyennes sur la planète due à la modification de la concentration des GES naturellement présents dans l'atmosphère (CO₂, CH₄, N₂O,...) ; c'est ce que l'on appelle effet de serre additionnel (Picot et Montadon, 2013).

Quelle que soit l'utilisation que l'on fait de ces énergies, elles ont irrémédiablement un impact néfaste sur l'environnement : la perte de la biodiversité (**Picot Montadon, 2013**), la contamination des eaux souterraines, le développement de maladies cardio-vasculaires et de l'asthme, l'érosion des sols et la dégradation des écosystèmes (**Durango, 2019**).

III. Sol pollué par un hydrocarbure

Définition de la pollution

La pollution est l'introduction dans l'air, l'eau et le sol de matières solides ou de fluides qui entraînent l'altération de ces environnements et présentent des effets néfastes pour les êtres humains ou les écosystèmes. Les activités anthropiques sont souvent à l'origine de la pollution impactant la qualité de l'air, de l'eau et du sol avant de rejoindre des récepteurs biologiques (**Bouزيد, 2019**).

III-2. Définition d'un sol pollué

On parlera de pollution des sols en cas de forte concentration de composés chimiques dangereux pour la santé des plantes et des animaux. Ces composés se propageront aussi dans l'air et dans les eaux et la contamination pourra alors se faire par voie respiratoire en inhalant des poussières ou par voie digestive en consommant l'eau polluée par exemple (**Amirat, 2010**).

III-3. Définition d'un polluant

Un polluant peut être un gaz, un aérosol, un liquide ou un solide d'origine anthropique ou naturelle. C'est une substance connue pour avoir des effets néfastes sur tout ou une partie d'un écosystème ou de l'environnement, en général (**Tétreault, 2016**).

Principaux types de polluants

III.4.1. Polluants inorganiques

Ils constituent un ensemble d'éléments généralement non biodégradables, accumulatifs et toxiques quand ils sont présents en grande quantité. Les plus rencontrés sont le cadmium (**Cd**), le chrome (**Cr**), le cuivre (**Cu**), le mercure (**Hg**), le nickel (**Ni**), le plomb (**Pb**), le zinc (**Zn**) et l'arsenic (**As**). Ils sont présents naturellement à des concentrations généralement basses dans les sols et proviennent, en grande partie, de l'altération de la roche mère mais les

activités anthropiques telles que l'agriculture, le trafic routier et l'incinération d'ordures peuvent conduire à l'augmentation de leurs concentrations naturelles (**Benfardia et Chenine, 2014**).

III.4-2. Polluants organiques

Les hydrocarbures sont les principaux polluants organiques et les plus couramment impliqués dans la pollution des sols. Il s'agit des hydrocarbures aromatiques polycycliques (**HAP**), les polychlorobiphényles (**PCB**), les polychlorodibenzo-dioxines (**PCDD**), les composés organiques volatils (**COV**) et les pesticides (**Benfardia et Chenine, 2014**).

Types de pollution

III.5.1. Pollution diffuse

Elle concerne une grande superficie. Elle peut être due aux pratiques agricoles comme l'épandage ou aux retombées atmosphériques d'origine urbaine, industrielle ou routière (**Carnicer et Victoria, 2007**).

III-5-2. Pollution ponctuelle

Elle se distingue par la présence ponctuelle dans les sols et sous-sols de substances dangereuses provenant généralement de déversements, de fuites ou de dépôt de déchets. Non confinées et en fortes concentrations, ces substances donnent naissance à des sites localement contaminés (**Carnicer et Victoria, 2007**).

Principales sources de contamination par les HC

La contamination du sol par les hydrocarbures occupe une position particulière en raison de la toxicité et de l'effet cancérigène de certains d'entre eux et des quantités importantes susceptibles d'être introduites dans le sol. Ce phénomène s'est accentué ces dernières années avec l'augmentation remarquable de la consommation des hydrocarbures.

Ces substances peuvent être libérées dans l'environnement par des phénomènes naturels tels que les feux de forêts, les éruptions volcaniques et les fuites des réservoirs naturels. Cependant, les activités anthropiques sont la source majeure de ce rejet d'hydrocarbures dans l'environnement; comme le transport, les déversements et les enfouissements volontaires de

déchets d'hydrocarbures liés à des activités domestiques, artisanales, commerciales, agricoles ou industrielles, ou même les retombées atmosphériques concernant les imbrûlés produits lors de la combustion ou les hydrocarbures gazeux vaporisés lors de fuites ou de manipulation (**Battaz,2009**).

IV. Techniques de traitement des sols contaminés par les hydrocarbures

On s'inquiète de plus en plus du taux de dégradation des écosystèmes que connaît actuellement le monde entier, dont une grande partie résulte de la production et de l'utilisation croissante de combustibles fossiles sur tous les continents. C'est pour cela que des techniques de dépollution sont mises en place afin de remédier l'environnement.

Techniques physiques

Les traitements physiques consistent à transférer et concentrer les polluants, sans les modifier ou les détruire, en se servant de fluides pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour son immobilisation (**Louati, 2013**).

Techniques chimiques

Les traitements chimiques ont pour but de détruire les polluants ou de les transformer en une forme moins nocive pour l'environnement ; et ceci par l'intermédiaire de réactions chimiques se produisant entre le polluant et le réactif ajouté. Ils peuvent être applicables in situ ou après excavation des sols. La majorité des procédés exigent que les sols soient sous forme de boues ou que les contaminants soient mobilisés dans un milieu liquide (**Bouderhem, 2011**).

Techniques thermiques

Ces techniques consistent à utiliser les hautes températures pour détruire les polluants en CO₂ et H₂O : la chaleur est utilisée pour modifier physiquement ou chimiquement les polluants. Deux techniques, ex-situ, sont utilisées; l'incinération et la désorption et sont employées pour la décontamination des sols pollués par les produits organiques (**Benfardia et Chenine, 2014**).

Techniques biologiques

Les traitements biologiques sont les techniques qui exploitent les propriétés d'un organisme vivant pour réaliser l'opération de dépollution (**Bouderhem, 2011**). Ils favorisent la biodégradation ou la bioaccumulation des composés polluants par les microorganismes ou les végétaux (**Dussaussy, 2021**). Il existe deux types principaux de techniques biologiques: la phytoremédiation et la bioremédiation

Bioremédiation

C'est est une option avantageuse pour diminuer la pression exercée sur l'environnement. Elle consiste en l'utilisation des organismes vivants (bactéries, champignons) pour la détoxification ou la réduction de la teneur en polluants industriels qui contaminent le cycle biogéochimique des substances naturelles (**Stepanova et al., 2022**) .

Techniques de bioremédiation

Le tableau 1 ci-dessous récapitule les principales techniques de bioremédiation

Tableau 1:Résumé des techniques de bioremédiation (**Vidali, 2001**).

Technique	Principe
Landfarming	Technique simple et peu onéreuse appliquée ex –situ, qui a pour objectif la stimulation de l'activité dépolluante des microorganismes autochtones.
Bioaugmentation	Méthode de traitement in –situ, qui consiste à introduire dans le sol des micro-organismes exogènes pour optimiser l'activité microbienne indigène responsable de la biodégradation des polluants organiques.
Compostage	Technique qui consiste à combiner un sol contaminé avec des amendements organiques non dangereux tels que du fumier ou des déchets agricoles qui vont favoriser le développement d'une population microbienne riche et d'une température élevée caractéristique du compostage.
Bioventing	Traitement in situ le plus courant qui consiste à fournir de l'air et des nutriments, par puits, au sol contaminé pour stimuler les bactéries indigènes.

Phytoremédiation

C'est l'utilisation de plantes pour l'accumulation, l'élimination ou la dégradation de matières ou polluants organiques provenant des sols, des aquifères et des eaux souterraines (**Stepanova et al., 2022**). Elle offre une réelle alternative, aussi bien écologique que paysagère et financière face aux techniques de dépollution traditionnelles pour aider à la réhabilitation des sols contaminés (**Origo, 2012**).

Techniques de phytoremédiation

IV.4.2.1.a. Phytoextraction

Processus qui utilise des végétaux afin d'extraire et d'accumuler les métaux potentiellement polluants dans les parties récoltables de plantes hyperaccumulatrices. La plante accède à la fraction la plus mobile des métaux du sol, l'appauvrit notablement et, par conséquent, réduit les risques de transfert des éléments toxiques vers les cibles sensibles, organismes vivants et eaux (**Baize, 2016**).

Phytodégradation

Accélération de la dégradation de composés organiques polluants (hydrocarbures, HAP, pesticides, etc.) grâce à la présence de certaines plantes (phragmites, peupliers, etc.). Cette dégradation peut avoir lieu soit hors de la plante, grâce à l'activité des micro-organismes de la rhizosphère, soit dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules par des enzymes spécifiques (**Baize, 2016**).

Phytostabilisation

Il s'agit du recours à des plantes supérieures vasculaires pour réduire la mobilité et la diffusion dans l'environnement des polluants contenus dans un sol : que ce soit sous forme de poussières entraînées par le vent, ou d'ions ou particules lessivés par l'eau. Cette technique ne vise pas l'élimination de la pollution, mais la fixation du polluant, évitant ainsi la recontamination de l'environnement autour des sites pollués (**Baize, 2016**).

Phytovolatilisation

Transformation des contaminants des sols en des composés gazeux qui sont relâchés dans l'atmosphère (**Baize, 2016**).

Matériel
et
méthodes

Cette partie de notre étude est divisée en deux parties distinctes :

- ✓ une partie, échantillonnage sur terrain ;
- ✓ une partie, analyses au laboratoire.

1. Présentation de la zone d'étude

La station expérimentale se situe dans la commune de Makouda ; une région montagneuse (à 910 m d'altitude) à mi-chemin entre Tizi-Ouzou et Tizgirt et à 19 km au nord du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou (**Figure 1**).

Le choix de ce site est justifié par le fait qu'il ait un déversement de carburants (essence, gasoil, etc.) lors du remplissage des réservoirs de stockage, ce qui conduit à la pollution des sols, ainsi que l'absence d'étude sur le sol de cette station.

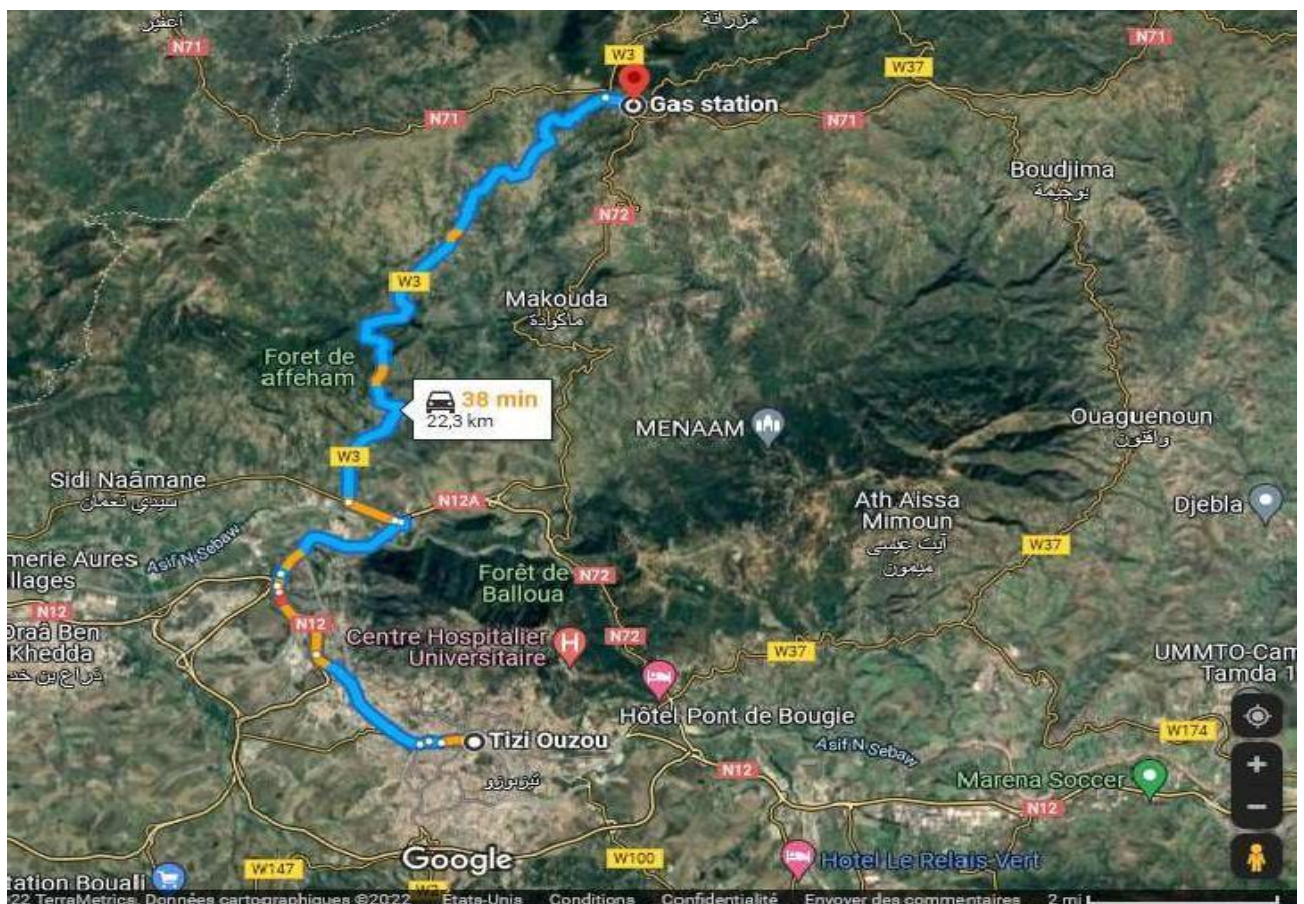


Figure 1: Localisation par satellite du site d'étude de Makouda (Google Maps, 2022).

2. Stratégie de prélèvement

Le prélèvement a été réalisé en une seule journée, le 21 mars 2022. Notre travail expérimental a été mené à proximité de la source de pollution, le prélèvement des échantillons correspond à la couche superficielle du sol (0-20 cm).

Nous avons délimité trois parcelles de prélèvement (**P₁**, **P₂**, **P₃**) de 30 cm/20 cm chacune. Le prélèvement (**P₁**) a été effectué tout près (1m) de la source de pollution à l'intérieur de la station-service. **P₂** a été prélevé à l'entrée de la station à 20 m d'écart de **P₁**. Le dernier prélèvement (**P₃**) est le point le plus distant de la source de pollution, il est loin d'environ 40 m du centre de la pollution.

3. Traitement et préparation des sols

Les sols échantillonnés 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 de mailles 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 sein du laboratoire de pédologie, le laboratoire commun ainsi que le laboratoire de chimie pharmaceutique de l'université de Mouloud Mammeri.

4. Analyses effectuées

Détermination de la texture

Nous avons opté pour le test du bocal. Nous avons pesé 20g de sol auquel nous avons ajouté 100 ml d'eau distillée. Nous avons, ensuite, agité le mélange pendant quelques minutes pour l'homogénéiser et nous l'avons laissé décanter pendant 24h (Figure 2).



Figure 2 : Test du bocal pour déterminer la texture.

Estimation de l'humidité hygroscopique

Nous avons pesé 5 g de sol tamisé à 2 mm. Les échantillons sont séchés dans une étuve à 105 °C pendant 24 h. Après séchage une deuxième pesée a été réalisée.

Le taux d'humidité s'exprime en % selon la formule suivante :

$$H \% = \frac{P1 - P0}{P0} \times 100$$

Avec :

-P1 : poids de la prise d'essai du sol (g).

-P0 : poids de la prise d'essai de sol après séchage à 105°C (g).

Mesure du pH

Le pH a été déterminé dans une suspension sol/eau distillée selon un rapport pondéro-volumique de **1/2,5** puis agité pendant 15 minutes avec une baguette en verre et laissé au repos pendant 15 minutes. Puis, l'électrode du pH mètre **WTW InoLab pH Level 2 P** est plongée dans le liquide surnageant. Les valeurs sont notées au deuxième décimale.

Détermination de la conductivité électrique (CE)

Nous avons pesé 20 g de sol, que nous avons placé dans un bécher ; auquel nous avons ajouté 100 ml d'eau distillée. Après une agitation de 2 minutes, nous avons laissé la solution au repos pendant 30 minutes puis nous l'avons filtré puis refiltré et nous lui avons ajouté 2 gouttes d'hexamétaphosphate de sodium à 0,1% pour éviter la précipitation de CaCO₃.

La conductivité électrique est mesurée à l'aide d'un conductimètre de terrain **ProfiLine Cond 1970i de WTW** au laboratoire de chimie pharmaceutique de l'université de Mouloud MAMMARI.

Dosage du calcaire total

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



Nous avons déterminé la quantité totale du calcaire par la méthode volumétrique, qui consiste à titrer l'excès de l'acide chlorhydrique par la soude à 1N.

Nous avons, d'abord, pesé 1g de terre tamisée à 2mm que nous avons placé dans un bécher de 250 ml. Nous lui avons ajouté 20 ml d'acide chlorhydrique à 1N et 100 ml d'eau distillée.

Le bécher est, ensuite, porté sur le bain de sable à 60°C et agité de temps à autre pendant 45 minutes puis laissé bouillir pendant quelques minutes (Figure 4). Après refroidissement nous avons filtré le contenu des béchers dans une fiole de 250 ml tout en lavant bien la terre.

Nous avons ajusté à 250 ml puis prélevé 100 ml du filtrat auquel nous avons ajouté 3 gouttes de phénolphthaléine à 2%. Nous avons titré le reste d'acide chlorhydrique par la soude à 1N. Le virage a eu lieu vers le rouge violacé.

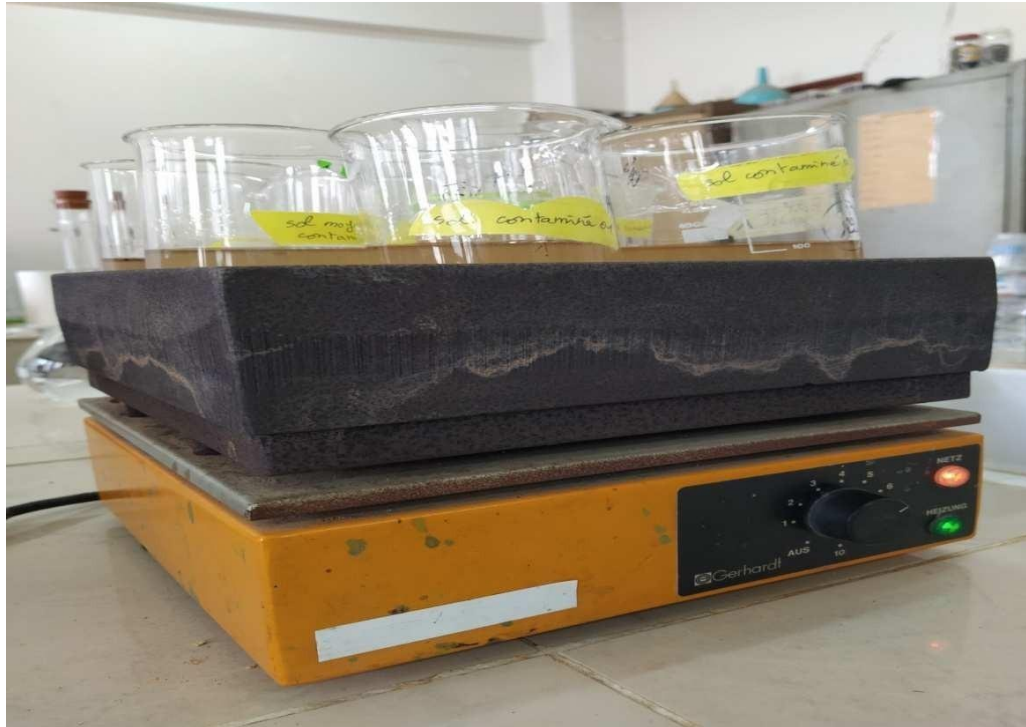


Figure 3 : Béchiers portés sur bain de sable.

Dosage des anions

• **Les carbonates** : cette détermination repose sur la neutralisation d'un volume (10ml) de solution par un acide minéral, dilué, en présence d'un indicateur coloré.

Pour cela, il faut prélever une fraction aliquote de 10 ml de l'extrait du sol et y ajouter quelques gouttes de phénolphtaléine. Si une coloration rouge se développe, titrer doucement avec du H_2SO_4 à 0,1N, jusqu'à décoloration totale.

S'il n'y a pas de coloration, après addition de phénolphtaléine, il n'y a pas de carbonates dans l'échantillon.

• **Les bicarbonates** : Après dosage des carbonates, ajouter dans la même prise, quelques gouttes de méthyle orange, et titrer par le même acide (H_2SO_4) jusqu'au virage du jaune au rouge.

• **Les chlorures** : Ajouter dans une prise d'essai d'extrait du sol, 1 à 8 gouttes de chromate de potassium à 5%, puis titrer avec le nitrate d'argent en solution à 0,02N

Dosage du carbone organique

Ce dosage est basé sur l'oxydation du carbone par le bichromate de potassium en milieu fortement acide (acide sulfurique).

Dans un ballon de 250 ml, nous avons mis 1g de terre fine, auquel nous avons ajouté 10 ml de solution de bichromate et 15 ml d'acide sulfurique concentré. Puis, nous avons porté le ballon à ébullition modérée pendant 5 minutes à compter de l'apparition de la première goutte de condensation.

Nous avons laissé refroidir puis transvaser dans un ballon jaugé de 200 ml et ajuster avec les eaux de rinçage au trait de jauge. Après l'homogénéisation, nous avons prélevé à l'aide d'une pipette, une aliquote de 20 ml, que nous avons dilué avec 200 ml d'eau distillée puis nous avons ajouté une pincée de fluorure de sodium en poudre et 4 gouttes de diphenylamine. Enfin, nous avons titré l'excès de bichromate à l'aide d'une solution de sel de Mohr à 0.2N.

Le taux de carbone organique est calculé selon la formule suivante :

$$\frac{(A - B) \times 10 \times 0,004}{P \times A} \times 100$$

Avec :

A : Volume de sel de Mohr utilisé pour titrer le témoin.

B : Volume de sel de Mohr utilisé pour titrer l'échantillon à doser.

10 : Volume de bichromate ajouté.

0,004 : Nombre de grammes de carbone par mole de bichromate.

P : Poids de l'échantillon titré exprimé sur base sèche (g).

100 : Facteur pour obtenir un pourcentage.

Dosage de la matière organique

La teneur en MO est obtenue en multipliant le taux du carbone organique par le coefficient 1,724 selon la formule suivante :

$$\%MO = \%C \times 1,724$$

5. Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont fait l'objet d'analyse de la variance (ANOVA) à un seul facteur 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

Résultats
et
discussion

I. Résultats

Le sol est caractérisé par ses propriétés physico-chimiques et biologiques. Les interrelations entre ces différentes propriétés déterminent la capacité et les limites du sol pour assurer la fonction de support de biomasse, et conditionnent plus globalement l'utilisation des terres.

Afin de caractériser l'effet des hydrocarbures sur les propriétés du sol, nous avons effectué des analyses physiques et chimiques sur des prélèvements du sol d'une station-service de la région de Makouda.

Effet des hydrocarbures sur le sol

Granulométrie

Les résultats dans le SP₁ ont montré 46,66 % de sable, 33,33 % de limons et 20% d'argile donnant lieu à la classe texturale équilibrée. Le SP₂ présentait 25% de sable, 50% de limon et 25% d'argile donnant lieu à la classe texturale équilibrée. Le SP₃ avait 30% de sable, 45% de limon et 25% d'argile donnant lieu à une classe texturale équilibrée. On observe que les hydrocarbures n'ont pas affecté la texture du sol (Figure 4).

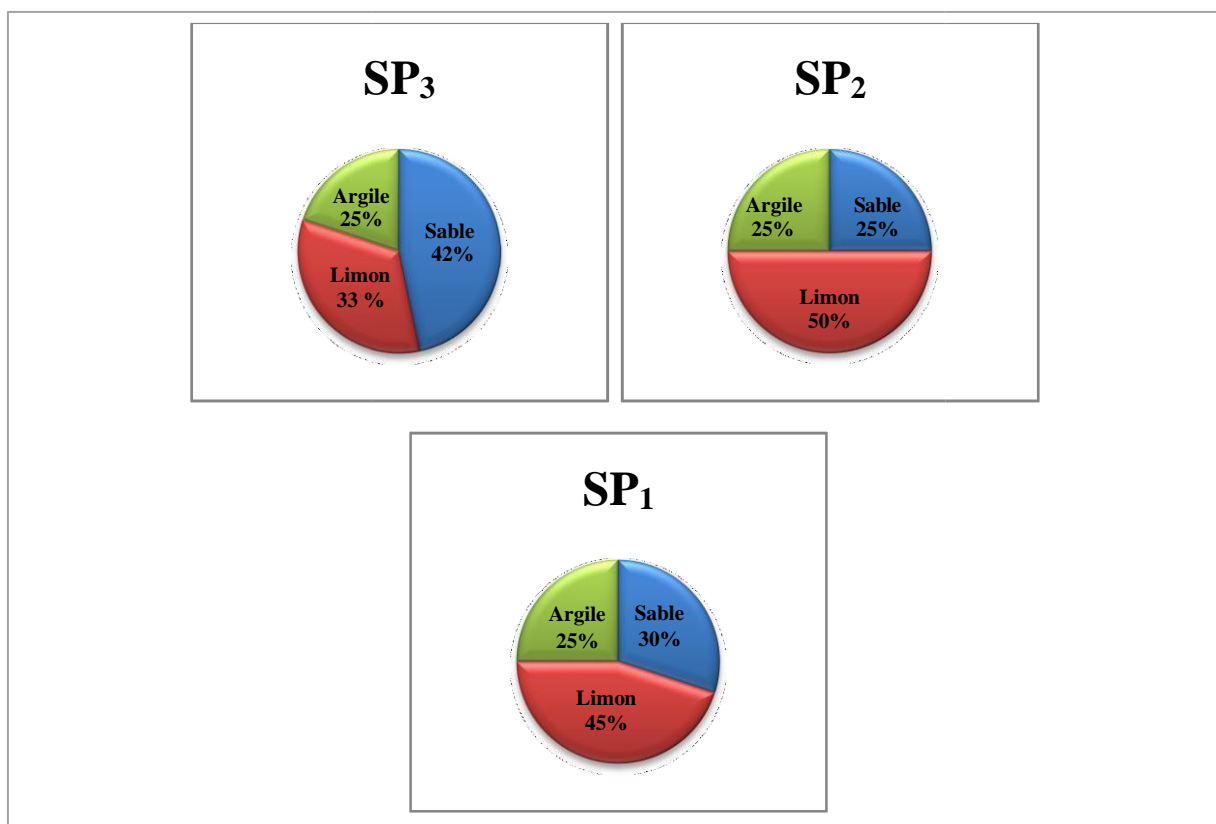


Figure 4 : Composition granulométrique des sols étudiés.

I. 1.2. Humidité

Selon les résultats rapportés par la figure 5, il y a une augmentation de l'humidité en s'approchant du centre de la pollution: 4,43% pour le SP3, 4,89% pour le SP2 et enfin 5,04% pour le SP1.

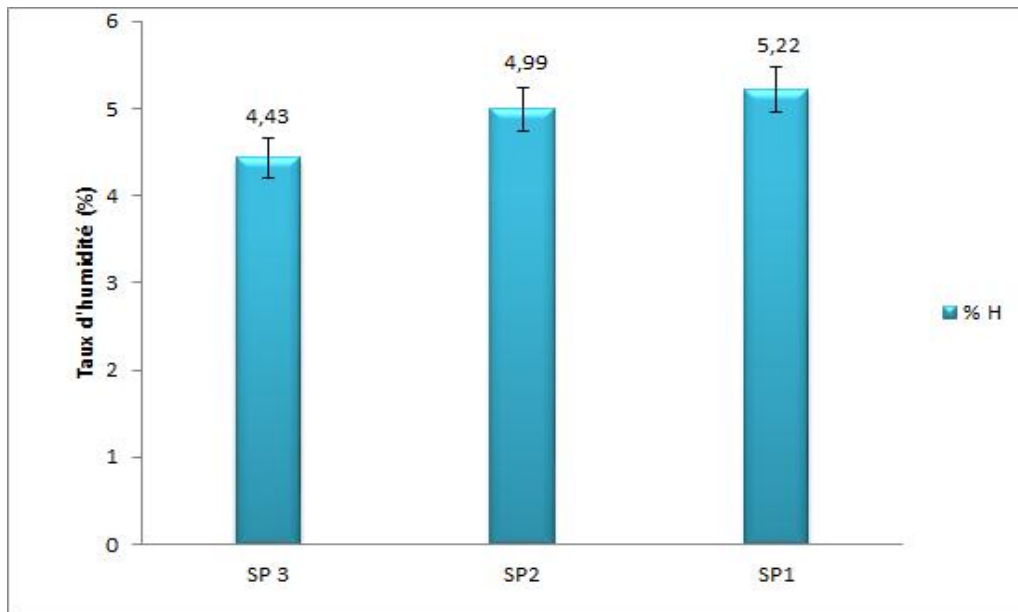


Figure 5 : Taux d'humidité des sols étudiés.

Le test de Kruskal Wallis, montre que le taux d'humidité varie de façon significative pour le facteur sol ($P = 0.04965$)

I. 1.3. Potentiel d'Hydrogène

Nous avons remarqué une baisse des valeurs de pH selon le gradient de pollution : 6,74 pour le SP₃, 6,18 pour le SP₂ et 5,78 pour le SP₁ (Figure 6). Les valeurs enregistrées dans la présente étude indiquent un milieu neutre pour le SP₃, légèrement acide pour le sol SP₂ et un milieu acide pour le SP₁ (SSDS, 1993).

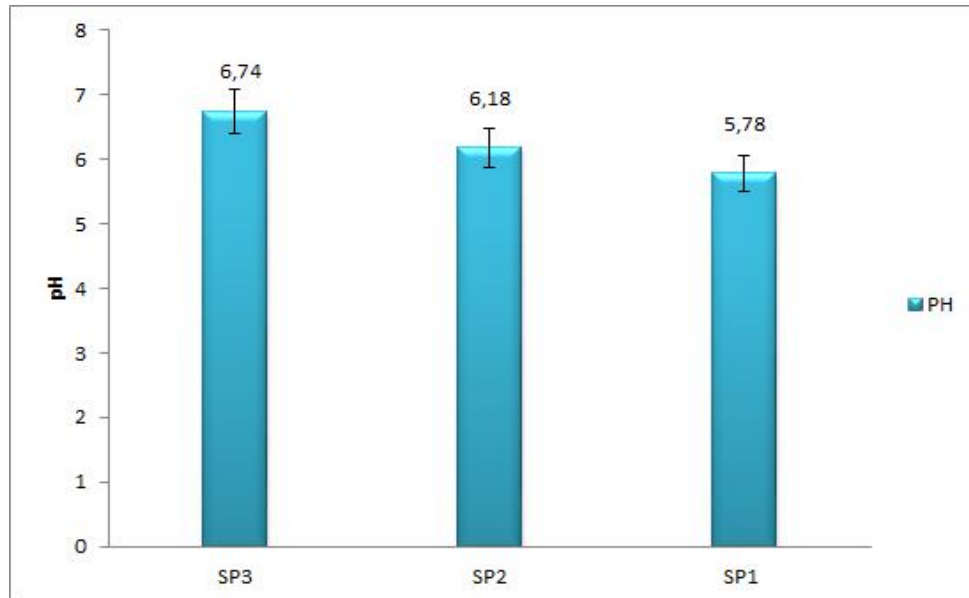


Figure 6 : pH des sols étudiés.

D'après les résultats traités par l'ANOVA pour le pH, il y'a une différence très hautement significative pour le facteur sol ($p = 2,334e-06$).

Le test de Newman et Keuls concernant le pH pour le facteur sol a donné 3 groupes homogènes. Le groupe a représenté le SP₃ avec un pH de 6,74. Dans le groupe b, nous avons le SP₂ avec un pH de 6,18. Enfin, le groupe c qui correspond au SP₁ avec un pH de 5,78.

I. 1.4. conductivité électrique (CE)

Selon les résultats présentés dans la figure 7. Nous remarquons une augmentation du taux de la CE en s'éloignant de la source de pollution. Le SP₃ présente ainsi, la valeur la plus importante qui est de 0,8 mS/cm, puis elle diminue légèrement dans le SP₂ avec une valeur de 0,78 mS/cm, jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur minimale de 0,72 mS/cm dans le SP₁.

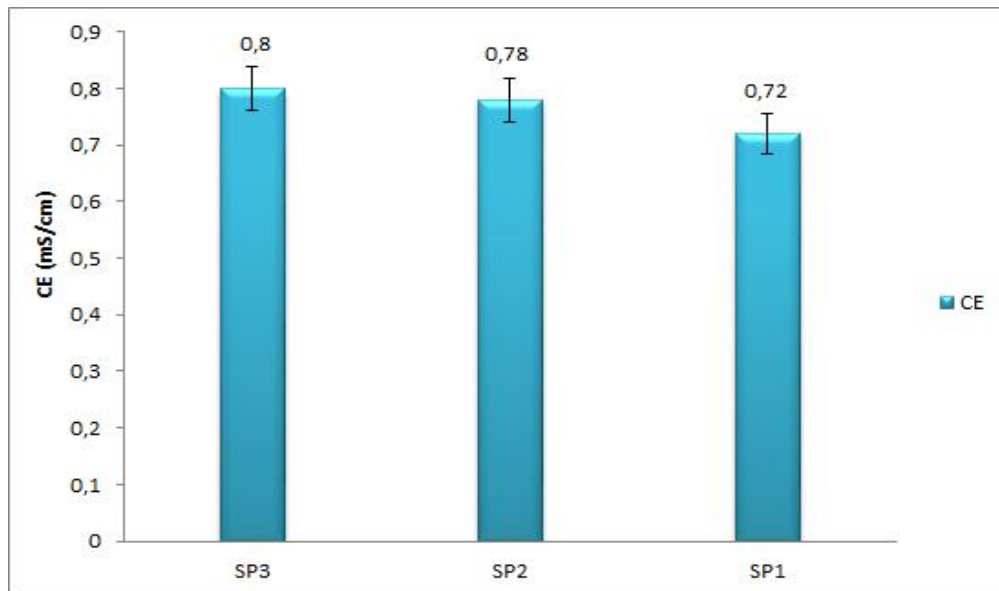


Figure 7 : Conductivité électrique des sols étudiés.

Le test de Kruskal Wallis (Annexe II), pour la conductivité électrique révèle qu'il n'y'a pas de différence significative pour le facteur sol ($P= 0.1387$). A cet effet nous pouvons confirmer que les hydrocarbures n'ont pas d'effets sur la CE du sol.

I. 1.5. Calcaire total

Les résultats (Figure 8) montrent que le calcaire total des sols étudiés varie entre un minimum de 11,55% enregistré au niveau du SP₁ et un maximum de 17,42% au niveau du SP₃.

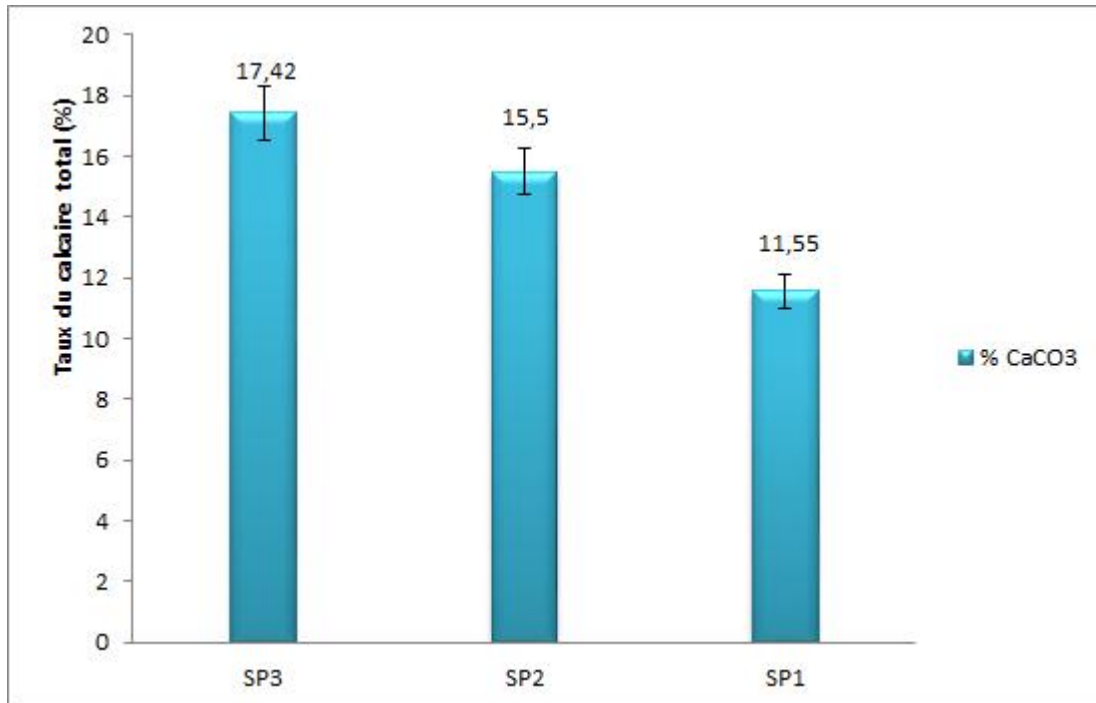


Figure 8 : Variation du calcaire total dans les sols étudiés.

Les résultats du test d'ANOVA concernant le taux de calcaire total des échantillons étudiés (Annexe II) ont montré une différence très hautement significative ($p=0.0005222$).

Le test de Newman et Keuls concernant le calcaire total, a donné 3 groupes homogènes. Le groupe a représenté le SP₃ avec un taux de calcaire égal à 17,42%. Dans le groupe b, nous avons le SP₂ avec un taux de calcaire égal à 15,5%. Enfin, le groupe c correspond au SP₁ avec un taux de calcaire égal à 11,55%.

I. 1.6.Sels solubles

I. 1.6.1.Bicarbonates

Sur la base des données illustrées par la figure 9, le SP₃ présente le taux de bicarbonates le plus faible qui est égal à 0.17Meq/l. Une légère augmentation est notée dans le SP₂ avec un taux de 0.43Meq/l. Le SP₁, quant à lui, présente le taux de bicarbonates le plus élevé qui est de 0.63Meq/l.

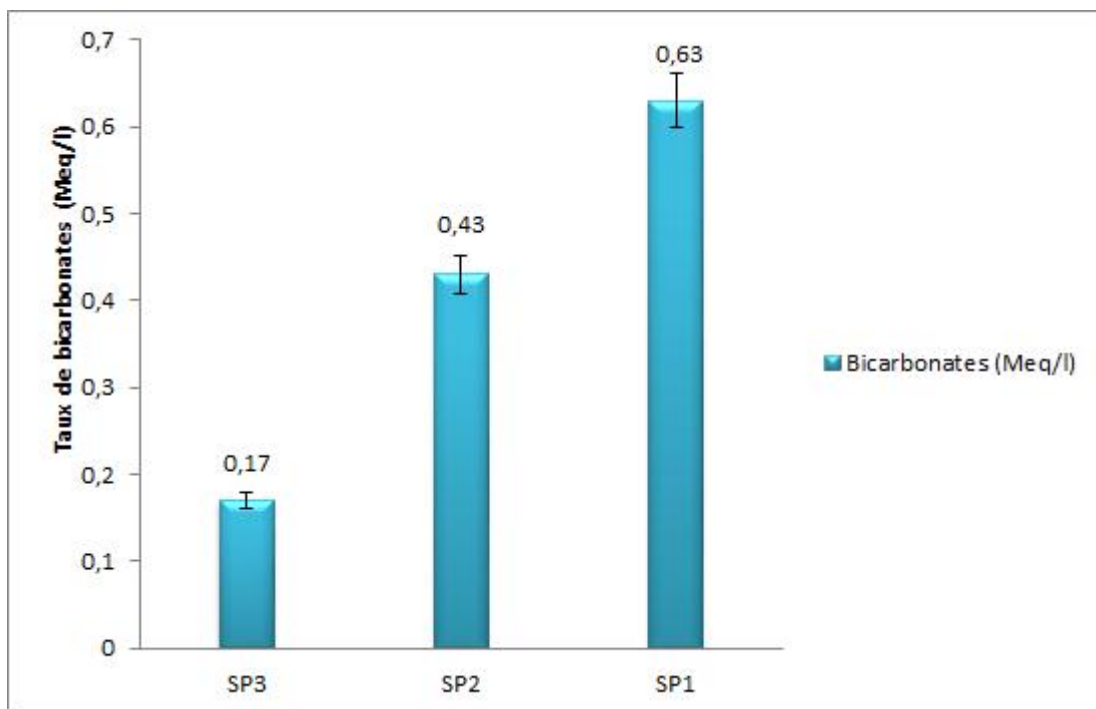


Figure 9 : Taux de bicarbonates des sols étudiés.

Les résultats du test d'ANOVA concernant la variable teneur du sol en bicarbonates des échantillons étudiés (Annexe II) ont montré une différence très hautement significative pour le facteur sol ($p=0,0001884$).

Le test de Newman et Keuls concernant les bicarbonates, a fait ressortir 3 groupes homogènes. Le groupe a concerné le SP₁ avec une moyenne de 0,63 Meq/l. Dans le groupe b, nous avons le SP₂ avec une moyenne de 0,43 Meq/l. Enfin, le groupe c renferme le SP₃ avec une moyenne de 0,17Meq/l.

I. 1.6.2. Chlorures

D'après les résultats illustrés dans la figure 10, le taux de chlorures le plus faible est de 1,17 Meq/l enregistré au niveau du SP3. Une augmentation est observée dans le SP2 avec une valeur de 1,4 Meq/l.

Au niveau du SP1, nous avons enregistré la valeur la plus élevée qui est de 1,73 Meq/l.

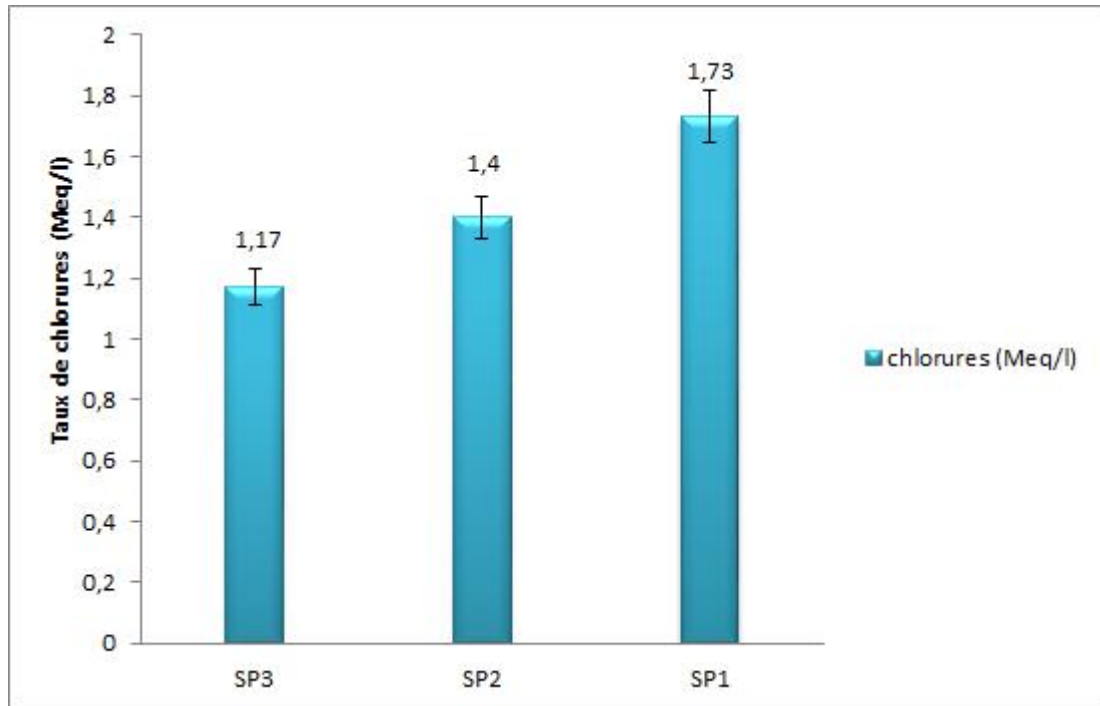


Figure 10 : Taux de chlorures des sols étudiés.

Les résultats du test d'ANOVA concernant les chlorures (Annexe II), ont montré une différence très hautement significative pour le facteur sol ($P=0,0009634$).

Le test de Newman et Keuls a fait ressortir 3 groupes homogènes concernant le taux de chlorures. Le groupe a correspond au SP₁ avec un taux moyen de chlorures de 1,73 Meq/l. Le groupe b renferme le SP₂ avec un taux moyen de chlorures de 1,4 Meq/l. Enfin, le groupe c concerne le SP₃ avec un taux moyen de chlorures de 1,17 Meq/l.

I. 1.7. Carbone organique

La figure 11 illustre les résultats du taux de carbone organique des sols étudiés. Elle montre que la valeur la plus élevée est de 3,02% enregistrée au niveau du SP₁. Le taux de carbone diminue dans le SP₂ avec un taux de 1,51% et pour le SP₃, nous avons enregistré un taux de 0,62%.

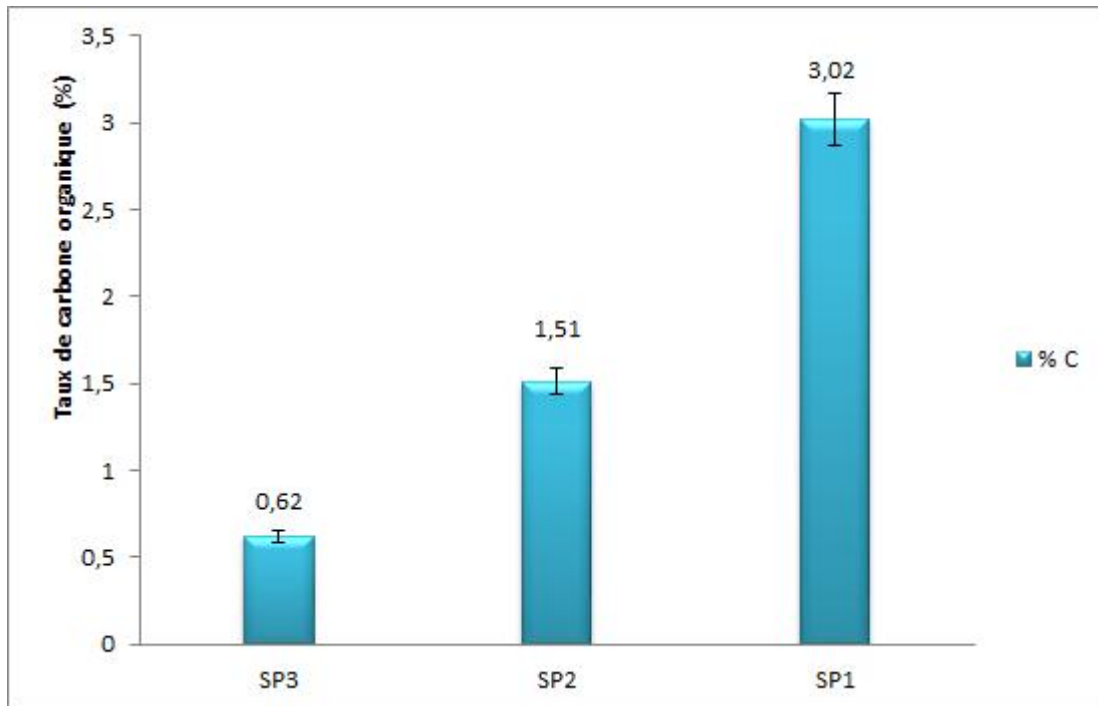


Figure 11 : Taux de carbone organique des sols étudiés.

D'après les résultats traités par l'ANOVA pour le carbone organique, il y'a une différence très hautement significative pour le facteur sol ($P=2.085e-05$).

Le test de Newman et Keuls concernant le carbone organique pour le facteur sol a donné 3 groupes homogènes. Le groupe a représenté le SP₁ avec un taux moyen de carbone organique de 3,02%. Le groupe b renferme le SP₂ avec un taux moyen de carbone organique de 1,51% et le groupe c concerne le SP₃ avec un taux moyen de carbone organique de 0,62%.

I. 1.8. Matière organique

Les résultats obtenus (Figure 12) montrent que la matière organique du SP₃ est inférieure à celle du SP₁.

La variation du taux en matière organique suit celle du carbone organique, la valeur extrême est enregistrée dans le SP₁ (5,21%). Pour le SP₂, nous avons enregistré un taux égal à 2,60%. La valeur minimale est de 1,07% et est enregistrée au niveau du SP₃.

Les résultats obtenus dans la présente étude indiquent que le SP₃ est pauvre en matière organique. Le SP₂ possède un taux modéré et le SP₁ possède un taux élevé en matière organique selon Hazelton and Murphy (2007).

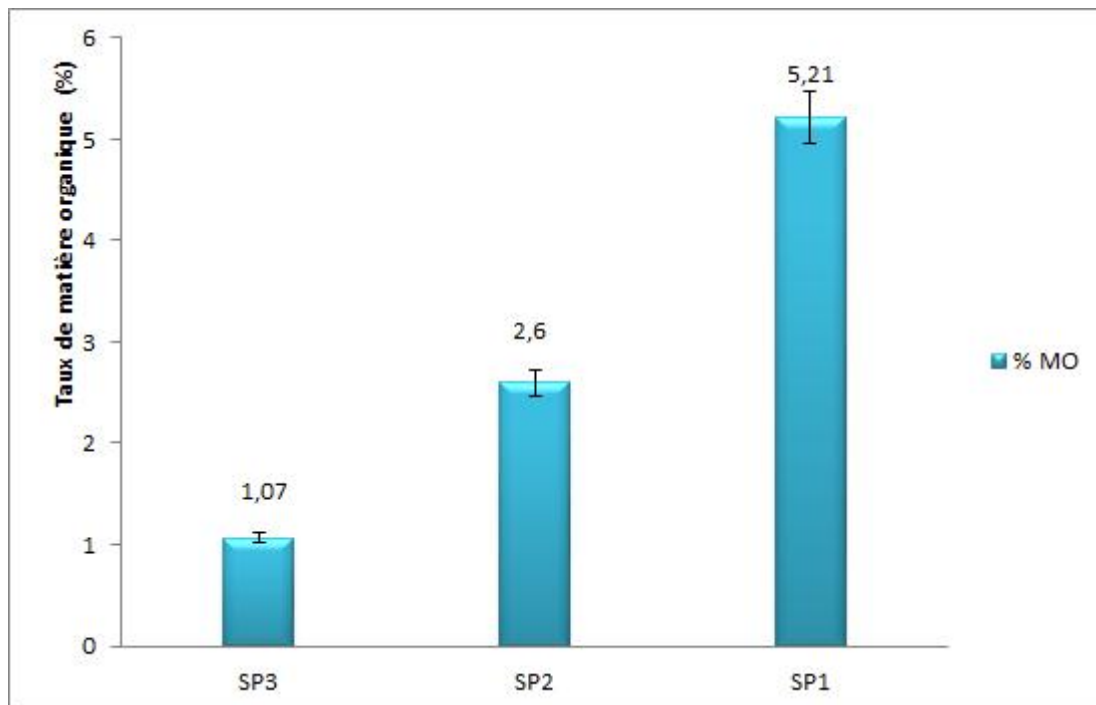


Figure 12 : Taux de la matière organique des sols étudiés.

Le test de l'ANOVA pour la matière organique, révèle une différence très hautement significative pour le facteur sol ($P=2.07e-05$).

Le test de Newman et Keuls concernant la matière organique a donné 3 groupes homogènes. Le groupe a renferme le SP₁ avec un taux moyen de matière organique de 5,21%. Le groupe b correspond au SP₂ avec un taux moyen de matière organique de 2,60%. Enfin, le groupe c renferme le SP₃ avec un taux moyen de matière organique de 1,07%.

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 dans les figures 13 et 14.

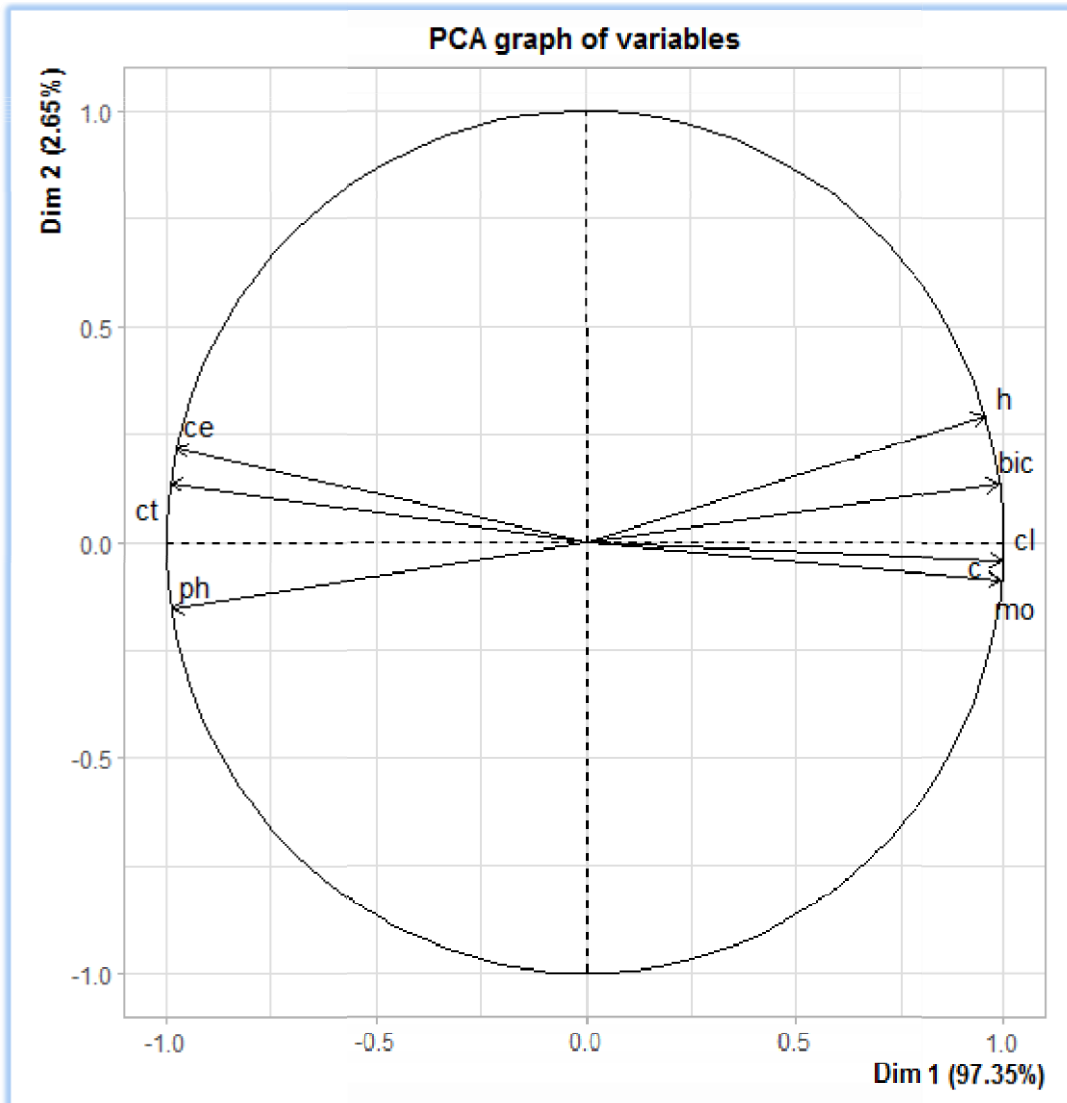


Figure 13 : Graphe ACP (Variables) pour les paramètres physicochimiques des sols étudiés.

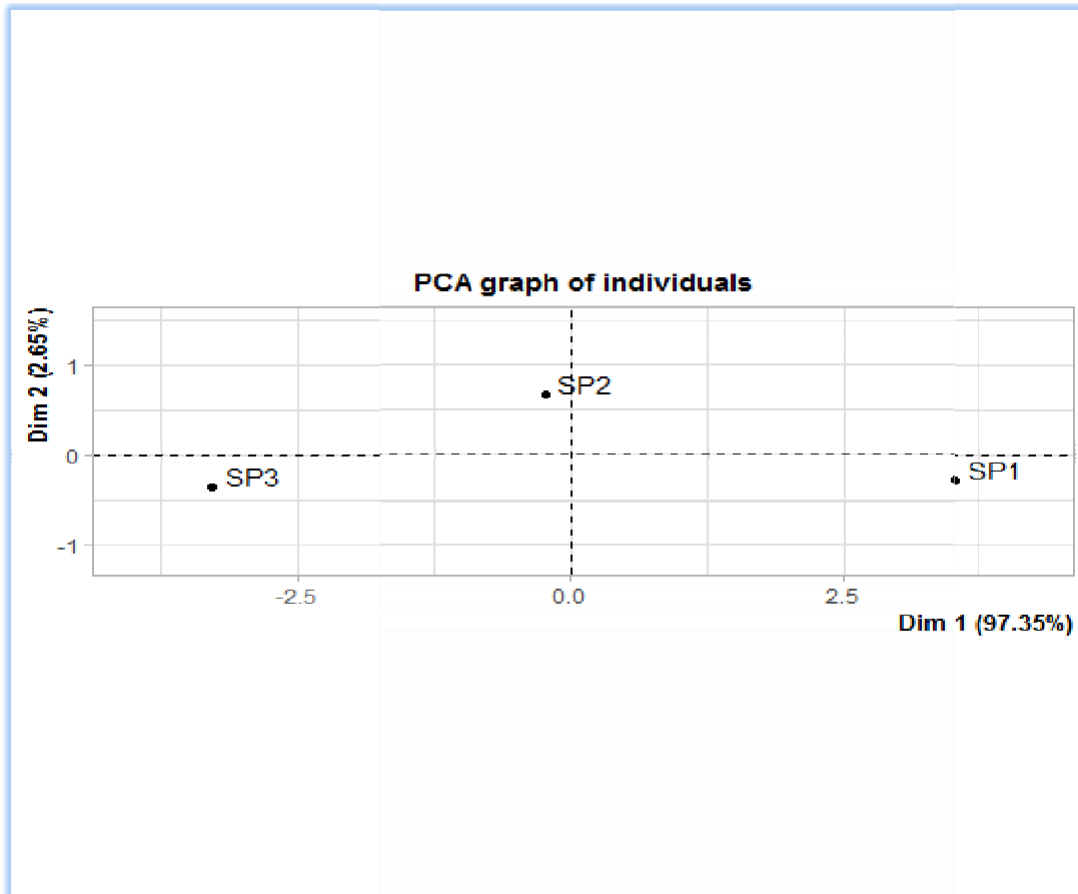


Figure 14 : Graphe ACP (Individus) pour les paramètres physicochimiques des sols étudiés.

Il ressort de ces figures que :

- Le carbone organique et la matière organiques sont corrélés positivement.
- Le calcaire total et la conductivité électrique sont corrélés positivement.
- Le pH et l'humidité sont corrélés négativement.
- Le SP₃ a le meilleur pH.
- Le SP₁ a la meilleure teneur en carbone organique, en matière organique et en sels solubles ainsi qu'un meilleur taux d'humidité.
- Le SP₂ est le meilleur en ce qui concerne la conductivité électrique et le calcaire total.

II. Discussion

La mesure du taux d'humidité des échantillons de sol montre que le taux d'humidité du SP₁ est supérieur par rapport au taux d'humidité des sols SP₂ et SP₃. Ces résultats s'opposent à ceux de Chikhaoui et Hettak (2019) qui attestent que le taux d'humidité est plus important dans les strates non contaminées.

Degranges et ses collaborateurs (1977), expliquent l'augmentation du taux d'humidité par l'effet de la pollution par les hydrocarbures qui empêchent l'eau de s'évaporer. Ils attestent que les parcelles de terre contaminée par les hydrocarbures ont une humidité importante que celle des parcelles de terre témoin (non contaminée).

Les résultats obtenus concernant le pH des trois sols, indiquent un milieu neutre pour le SP₃, légèrement acide pour le SP₂ et un milieu acide pour le SP₁. Le pH a tendance à diminuer en suivant le gradient de pollution ; c'est-à-dire que le pH du SP₁ est inférieur à celui du SP₃, et le test d'ANOVA a révélé qu'il y a une différence très hautement significative entre les trois sols, ce qui confirme que le pH est influencé par les hydrocarbures. Contrairement aux résultats de Chikhaoui et Hettak (2019) qui rapportent que le pH a tendance à diminuer dans les strates qui sont loin de la source de pollution par rapport au pH des sols des strates proches de la source de pollution.

D'après NJOKU *et al.* (2009), la diminution du pH est due à la dégradation des hydrocarbures et pourrait être provoquée par l'accumulation des acides organiques produits lors de cette dégradation dans le sol. Par contre Berge *et al.*, (1986), note que cette diminution est due soit à l'oxydation des n-alcanes, soit à celle des composés provenant de la rupture de noyaux aromatiques.

La conductivité électrique est une mesure qui permet d'estimer la concentration des sels solubles présents dans un échantillon. Les résultats de la conductivité électrique obtenus nous montrent qu'il n'y a pas une différence significative entre les différents sols étudiés, ils sont tous non salins. Nos résultats sont similaires à ceux d'Aumar et Sediri (2018), ainsi qu'à ceux de Khimeche et Oudai (2019), donc la conductivité électrique n'a pas été influencée par les rejets de la station-service.

D'après les résultats obtenus pour le dosage du calcaire total des échantillons étudiés, les sols sont modérément calcaires. Nous avons constaté que le taux du calcaire total diminuait quand la teneur en hydrocarbures augmente: la valeur maximale est enregistrée au niveau su

SP₃, tandis que la valeur minimale est enregistrée au niveau du SP₁. Le test d'ANOVA a révélé qu'il y a une différence très hautement significative entre les trois sols, ce qui confirme que les hydrocarbures ont une influence sur ce paramètre. Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par Lamiri et Nezlioui (2017) ainsi que ceux obtenus par Khimeche et Oudai (2019) qui avaient constaté une augmentation des valeurs du calcaire dans le sol témoin et une diminution remarquable dans les valeurs du calcaire dans les sols très pollués.

Cette différence est peut être due à l'apport d'hydrocarbures contrairement aux résultats de Degranges (1977) qui avait conclu que la composition chimique entre le sol témoin et le sol contaminé par les hydrocarbures présentait peu de différence au niveau des éléments majeurs, ce qui signifie que la contribution des hydrocarbures à ces éléments est négligeable par rapport à la teneur du sol.

Les résultats obtenus pour le dosage des sels solubles montrent une augmentation de la teneur de ces derniers en s'approchant du centre de la pollution. Nos résultats convergent avec ceux de Lamiri et Nezlioui (2017) et ceux de Khimeche et Oudai (2019) qui rapportent qu'il y a une augmentation de la teneur du sol en sels solubles en fonction du gradient de pollution.

La teneur en carbone organique est une valeur importante pour l'étude des contaminations par les hydrocarbures. Godwin et al. (2013) attestent que le taux de carbone a augmenté dans le sol pollué comparé au sol témoin, en raison des activités des hydrocarbures qui utilisent des microorganismes agissant et libérant du carbone dans le sol. Nos résultats montrent également une teneur en carbone accrue dans l'échantillon du SP₁ par rapport aux échantillons des SP₂ et SP₃ en raison de l'apport d'hydrocarbures dans le sol par les rejets de la station-service. Nos résultats convergent avec ceux d'Aumar et Sediri (2018) qui ont observé que le taux de carbone est plus élevé dans les strates polluées par rapport aux strates non polluées. Cependant, Dendani et Saad (2017), avaient remarqué qu'il n'y a pas une différence significative entre les trois sols, c'est à dire que les hydrocarbures déversés par cette station n'ont pas affecté le taux du carbone organique.

Les variations des teneurs en matières organiques sont directement corrélées à celles des teneurs en carbone car la teneur en matière organique est calculée par multiplication de la teneur en carbone organique par le facteur de van Bemmelen (1890). Ce facteur (1,724) repose sur l'hypothèse que le contenu en carbone des matières organiques est de 58% en moyenne.

Les résultats du taux de matière organique montrent qu'il y a une différence très hautement significative entre les trois sols. En comparant les sols SP₂ et SP₁, le SP₃ a la valeur la plus faible en matière organique tandis que la valeur maximale est enregistrée au niveau du SP₁, ce qui signifie qu'elle augmente avec l'augmentation de la teneur du sol en hydrocarbures, et Fayuelle (2013), affirme qu'il y'a une interdépendance complexe entre contamination en hydrocarbures et teneurs en matières organiques dans les sols. Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par Aumar et Sediri (2018), Khimeche et Oudai (2019) qui avaient noté que la teneur en matière organique des sols pollués est supérieure à sa teneur dans les sols non pollués. Mais, ils se confrontent à ceux de Dendani et Saad (2017) qui avaient remarqué que le taux de la matière organique du sol non pollué est supérieur à sa teneur dans le sol pollué.

Conclusion
et
perspectives

L'objectif de notre travail était d'étudier l'influence des hydrocarbures sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol prélevé de la station-service de Makouda.

A l'issue de cette étude, la plupart des paramètres physico-chimiques sont impactés et les principales conclusions peuvent être résumées ainsi :

- ✓ Le taux d'humidité est variable d'un sol à un autre, il est influencé par la contamination. Nous constatons une augmentation en allant du SP₃ vers le SP₁.
- ✓ Pour le potentiel d'hydrogène, les valeurs enregistrées indiquent un milieu neutre pour le SP₃, légèrement acide pour le SP₂ et un milieu acide pour le SP₁.
- ✓ Les résultats obtenus pour la conductivité électrique indiquent que les sols sont loin d'être salins, et que les hydrocarbures n'ont pas exercé un effet sur ce paramètre.
- ✓ Les sols sont modérément calcaires. Le taux du calcaire total diminue progressivement en s'approchant du point du rejet.
- ✓ Le taux des sels solubles (bicarbonates et chlorures) augmente au fur et à mesure qu'on s'approche du centre de pollution.
- ✓ Le taux du carbone varie significativement entre les sols, il est plus élevé dans le SP₁.
- ✓ En ce qui concerne le taux de la matière organique les résultats, montrent une différence significative entre les sols, faible dans le SP₃, modéré dans le SP₂ et élevé dans le SP₁.

Les résultats obtenus montrent distinctement que la contamination des sols par les hydrocarbures constitue un problème sérieux dont il faudra s'occuper vu leurs effets néfastes sur les propriétés physico-chimiques du sol.

A travers cette étude, il semblerait que la méthode de traitement biologique est une solution bien fondée et prometteuse qui prendra en charge la pollution des sols et d'éliminera les hydrocarbures contenus dans les terres polluées. Elle est peu coûteuse que ce soit en énergie ou en argent, tout en améliorant le paysage. C'est une stratégie qui vise à restaurer les écosystèmes contaminés à l'aide d'êtres vivants, tels que des bactéries, des plantes, des champignons...

Il serait également intéressant d'effectuer une étude spatiale du réseau de distribution de produits pétroliers, ainsi que la conception des cartes répertoriant les sites contaminés de peu à fortement contaminé au niveau de la station-service où une décontamination est nécessaire.

Références bibliographiques

1. **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 INRA d'Alger, 135 p.
2. **Amirat, M. (2010).** Etude de la mobilité du Plomb et du Zinc en Fonction des paramètres physico-chimiques d'un sol en milieu routier. Thèse de doctorat en sciences biologiques, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella d'Oran, 178p.
3. **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.
4. **Aumar N., Sediri D. (2018).** Etude des propriétés physico-chimiques des sols de deux stations-services Idjeur et Fréha. Mémoire de Master en biodiversité et environnement, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 71p.
5. **Baize D. 2016.** Petit Lexique de pédologie. Edition Christel Desmaris, Nancy, France, 286 p.
6. **Battaz S. (2009).** Etude comparative de la dégradation d'une terre polluée par les hydrocarbures lourds. Mémoire de Magister en chimie, Université 20 Août 1955 de Skikda, 122 p.
7. **Benchouk, A. (2017).** Bioremédiation des sols pollués de pétrole par les micro-organismes et amélioration génétique de leurs pouvoirs de dégradation. Thèse de Doctorat en microbiologie appliquée, Université de Mostaganem, 199p.
8. **Benfardia H., Chenine A. (2014).** Effets de la nature du sol sur l'efficacité d'un dispositif de biodépollution à l'aide des bactéries hydrocarboruclastes. Mémoire de Master académique en Microbiologie appliquée. Université Kasdi Merbah Ouargla, 72p.
9. **Bouderhem A. (2011).** Utilisation des souches bactériennes telluriques autochtones dans la biodétection et la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures. Mémoire de Magister en Microbiologie appliquée. Université Kasdi Merbah Ouargla, 91 p.
10. **Bouزيد I. (2019).** Développement et évaluation d'une méthode à base de mousse pour l'oxydation améliorée de sols insaturés contaminés par des hydrocarbures. Thèse de Doctorat en chimie, Université Bourgogne Franche-Comté, 221 p.

11. **Calvet R. (2013)**. Le sol: Constitution, propriétés physiques, physicochimiques et chimiques. Organismes vivants. Qualité des sols (2^o Éd.). France Agricole Editions, 738 p.
12. **Carnicer P., Victoria M. (2007)**. La pollution ponctuelle des sols : Le Cas Des Stations-service dans La Région De Bruxelles -Capitale. Gestion de l'environnement Université Libres Bruxelles, 154 p.
13. **Chabane M. (2010)**. L'Algérie otage de ses hydrocarbures: obligation de réformes, urgence d'une reconversion. Cahiers de la Méditerranée (81) : 319-330.
14. **Degranges P., Gugalski T., Leleu M, Greffard J. (1977)**. Devenir des hydrocarbures dans les sols.
15. **Dendani T., Saad Dj. (2017)**. Les effets des hydrocarbures sur quelques propriétés chimiques et biologiques du sol. Cas de la station-service de Fréha. Mémoire de Master en protection de l'environnement, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 70p.
16. **Duchaufour P., Faivre P., Poulenard J., Gury M. (2018)**. Introduction à la science du sol 7e édition Sol, végétation, environnement. Dunod, 472 p.
17. **Durango J. (2019)**. Impacts environnementaux de l'exploitation pétrolière en Amazonie équatorienne: de l'étude spatiale de la vulnérabilité à l'évaluation du risque. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 214 p.
18. **Dussaussy B. (2021)**. Application des tensioactifs biosourcés à la remédiation des sols pollués aux hydrocarbures. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 269p.
19. **ES-Skalli A. (2015)**. Analyse physico-chimique des sols Agricoles. Mémoire de licence en sciences et techniques, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah de Fès, Maroc, 43 p.
20. **Fayeulle 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.
21. **Gabet S. (2004)**. Remobilisation d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l'aide d'un tensioactif d'origine biologique. Thèse de Doctorat. Université de Limoges, France, 176p.

22. **Gobat J. M., Aragno M., & Matthey W. (2010).** Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. PPUR Presses polytechniques (Vol. 14), 817 p.
23. **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.
24. **Gruyer N., Groleau P., Ouellet A., & Dupont R. (2015).** Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale – Études GENV222 et GENV23, Évaluation environnementale stratégique globale sur les hydrocarbures. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 55p.
25. **Hong S., Piao S., Chen A., Liu Y., Liu L., Peng S., ... & Zeng H. (2018).** Afforestation neutralizes soil pH. *Nature communications*, 9(1): 1-7.
26. **Jonard, F., Bogaen, H., Caterina, D., Garré, S., Klotzsche, A., Moneris, A., Schwank, M., Von Hebel, C. (2018).** Ground-based soil moisture determination. Springer International Publishing, 43p.
27. **Khimeche F., Oudai S. (2019).** Etude des caractéristiques physiques et chimiques des sols pollués par les carburants Cas des stations-services de Ouadhia et Yakourene. Mémoire de Master en biodiversité et environnement, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 77p.
28. **Koller E. (2004).** Traitement des pollutions industrielles (eau, air, déchet, sol, boues). Edition DUNOD Paris. 424 p.
29. **Lamiri F., Nezloui H. (2017).** Mémoire de Master en protection de l'environnement, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 48p.
30. **Larbi A. (2018).** Etude physico-chimique de l'agrégation des composés lourds d'un pétrole algérien. Thèse de Doctorat en sciences technologiques USTO, 145p.
31. **Lee K., Chen B., Boufadel M., Swanson S. M., Hodson P. V., Foght J., & Venosa A. (2015).** Expert panel report on the Behaviour and environmental impacts of crude oil released into aqueous environments. Royal society of Canada, Ottawa, 489p.
32. **Louati H. (2013).** Etude de la bioremédiation de sédiments contaminés par des hydrocarbures aromatiques polycycliques: Impact écologique sur la microflore et la méiofaune de la lagune de Bizerte .Thèse de Doctorat. Université de Carthage et Montpellier II, 276p.
33. **Mickaël H., Marine Z. (2020).** Faune du sol et production végétale. Planet vie.
34. **Njoku N., Akinola O., Obboh B.O. (2009).** Phytoremediation of crude oil contaminated soil. Edition mars land press, 85p.

35. **Origo N., Wicherek S. & Hotyat M. (2012).** Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation. *VertigO*, 12(2), 14p.
36. **Pärnpuu S., Astover A., Tõnutare T., Penu P., & Kauer K. (2022).** Soil organic matter qualification with FTIR spectroscopy under different soil types in Estonia. *Geoderma Regional*, 10p.
37. **Paradis R. (2016).** Distribution spatiale du carbone organique et de l'azote dans les sols en fonction des zones de récurrence d'inondation Thèse de Doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières, 124p.
38. **Picot A., Montandon F. (2013).** Écotoxicochimie des hydrocarbures. Lavoisier, 407p.
39. **Ravelojaona, J., Managneo, M. L., & Andriantsoa, E. (2020).** Modélisation de la variation du mode d'infiltration de l'eau dans le sol selon sa porosité. *Afrique SCIENCE* 16(1): 315-328.
40. **Rodrigo M. A., & Dos Santos E. V. (2021).** Electrochemically Assisted Remediation of Contaminated Soils. Springer International Publishing, 569p.
41. **SSDS- Soil survey Division Staff. 1993.** Examination and description of soils: In: *Soil survey Manual. Agricultural Handbook* 18, 503p.
42. **Stepanova A.Y., Gladkov E.A., Osipova E.S., Gladkova O.V., Tereshonok D.V. (2022).** Bioremediation of Soil from Petroleum Contamination. *Processes*, 10, 1224, 17p.
43. **Tétreault J. (2016).** Agent of deterioration: Pollutants. Canadian Conservation Institute, 23p.
44. **Valentin C. (2018).** Les sols au cœur de la zone critique 5: dégradation et réhabilitation, ISTE Group, 260p.
45. **Vidali M. (2001).** Bioremédiation: an overview. *Pure and applied chemistry* 73(7): 1163-1172.

Annexes

Annexe I : Analyses physico-chimiques du sol de la station-service de Makouda.**Tableau 01 :** Résultats d'analyses de l'humidité (%)

	SP ₃	SP ₂	SP ₁
Echantillon 1	4,45	4,60	5,13
Echantillon 2	4,38	5,12	5,22
Echantillon 3	4,45	5,26	5,30
Moyenne	4,43	4,99	5,22

Tableau 02 : Résultats d'analyses du pH

	SP ₃	SP ₂	SP ₁
Echantillon 1	6,80	6,16	5,80
Echantillon 2	6,76	6,13	5,76
Echantillon 3	6,67	6,26	5,77
Moyenne	6,74	6,18	5,78

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

	SP ₃	SP ₂	SP ₁
Echantillon 1	0,81	0,79	0,68
Echantillon 2	0,8	0,75	0,69
Echantillon 3	0,8	0,8	0,8
Moyenne	0,8	0,78	0,72

Tableau 04 : Résultats d'analyses du calcaire total (%)

	SP ₃	SP ₂	SP ₁
Echantillon 1	16,25	15	11,88
Echantillon 2	18,75	16,25	11,88
Echantillon 3	17,25	15,25	10,88
Moyenne	17,42	15,5	11,55

Tableau 05 : Résultats d'analyses des sels solubles**Bicarbonates (Meq/l)**

	SP ₃	SP ₂	SP ₁
Echantillon 1	0,2	0,5	0,6
Echantillon 2	0,2	0,4	0,6
Echantillon 3	0,1	0,4	0,7
Moyenne	0,17	0,43	0,63

Chlorures (Meq/l)

	SP ₃	SP ₂	SP ₁
Echantillon 1	1,1	1,5	1,7
Echantillon 2	1,1	1,3	1,7
Echantillon 3	1,3	1,4	1,8
Moyenne	1,17	1,4	1,73

Tableau 06 : Résultats d'analyses du carbone et de la matière organiques (%)

	SP ₃		SP ₂		SP ₁	
	carbone	MO	carbone	MO	carbone	MO
Echantillon 1	0,63	1,09	1,66	2,86	2,93	5,05
Echantillon 2	0,59	1,02	1,76	3,03	3,07	5,29
Echantillon 3	0,63	1,09	1,12	1,93	3,07	5,29
Moyenne	0,62	1,07	1,51	2,60	3,02	5,21

Annexe II : Résultats des analyses statistiques avec le logiciel R

1. Résultats du test ANOVA des paramètres physicochimiques

Humidité

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: humidité by sol
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 6.0056, df = 2, p-value = 0.04965
```

```
.
```

pH

```
Analysis of Variance Table
```

```
Response: ph
```

```
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
sol      2  1.4134  0.70671  223.17 2.334e-06 ***
Residuals  6  0.0190  0.00317
```

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Conductivité électrique

Kruskal-Wallis rank sum test

```
data: conductivité by sol
Kruskal-Wallis chi-squared = 3.9515, df = 2, p-value = 0.1387
```

Calcaire total

Analysis of Variance Table

Response: ct

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
sol	2	53.759	26.8797	34.254	0.0005222 ***
Residuals	6	4.708	0.7847		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Bicarbonate

Analysis of Variance Table

Response: hco3

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
sol	2	0.32889	0.164444	49.333	0.0001884 ***
Residuals	6	0.02000	0.003333		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Chlorures

Analysis of Variance Table

Response: chlorures

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
sol	2	0.48667	0.243333	27.375	0.0009634 ***
Residuals	6	0.05333	0.008889		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Carbone organique

Analysis of Variance Table

Response: carbone

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
sol	2	8.8762	4.4381	106	2.085e-05 ***
Residuals	6	0.2512	0.0419		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Matière organique

Analysis of Variance Table

Response: mo

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
sol	2	26.3162	13.1581	106.27	2.07e-05 ***
Residuals	6	0.7429	0.1238		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

2. Résultats du test de Newman et Keuls des paramètres physico chimiques

pH

\$comparison

NULL

\$groups

	ph groups
sp3	6.743333 a
sp2	6.183333 b
sp1	5.776667 c

Calcaire total

\$comparison

NULL

\$groups

	ct groups
sp3	17.41667 a
sp2	15.50000 b
sp1	11.54667 c

Bicarbonates

```
$comparison  
NULL
```

```
$groups  
      bicarbonates groups  
sp1   0.6333333      a  
sp2   0.4333333      b  
sp3   0.1666667      c
```

Chlorures

```
$comparison  
NULL
```

```
$groups  
      chlorures groups  
sp1  1.733333      a  
sp2  1.400000      b  
sp3  1.166667      c
```

Carbone organique

```
$comparison  
NULL
```

```
$groups  
      carbone groups  
sp1  3.023333      a  
sp2  1.513333      b  
sp3  0.6166667     c
```

Matière organique

```
$comparison  
NULL
```

```
$groups  
      mo groups  
sp1  5.210000      a  
sp2  2.606667      b  
sp3  1.066667      c
```

Annexe III : Les normes d'interprétation des résultats 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, 1988)

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

Carbone organique (Hazelton and 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 and 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

Résumé

Le sol est caractérisé par ses propriétés physico-chimiques et biologiques. Les interrelations entre ces différentes propriétés déterminent la capacité et les limites du sol pour assurer la fonction de support de biomasse, et conditionnent plus globalement l'utilisation des terres.

Notre étude a porté sur l'impact de la pollution par les hydrocarbures sur les caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol prélevés de la station service située à Makouda.

Les paramètres définissant la physico-chimie des sols étudiés sont l'humidité, le pH, la conductivité électrique, le calcaire total, les sels solubles, le carbone organique et la matière organique.

Les résultats obtenus ont révélé que les hydrocarbures ont un effet important sur les caractéristiques du sol, marqué par l'augmentation de certains paramètres tels que l'humidité, les anions, le carbone organique et la matière organique; et la diminution d'autres comme le pH et le calcaire total. Tandis qu'ils n'ont exercé aucun effet sur la conductivité électrique.

Mots clés : station-service, pollution des sols, carburants, pH, humidité, anions, carbone, matière organique

Abstract

Soil is characterized by its physico-chemical and biological properties. The interrelationships between these different properties determine the capacity and limits of the soil to ensure the function of biomass support, and more generally condition the use of the land.

Our study focused on the impact of hydrocarbon pollution on the physico-chemical characteristics of soil samples taken from the gas station located in Makouda.

The parameters defining the physico-chemistry of the soils studied are humidity, pH, electrical conductivity, total limestone, soluble salts, organic carbon and organic matter.

The results obtained revealed that hydrocarbons have a significant effect on the characteristics of the soil, marked by the increase of some parameters such as humidity, anions, organic carbon and organic matter; and the reduction of others such as pH and total limestone. While they had no effect on electrical conductivity.

Keywords: Gas station, soil pollution, fuels, pH, moisture, anions, carbon, organic matter.