République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Chahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biologie des Êtres Vivants

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

En : Écologie et Environnement

Spécialité : Écologie

"Estimation de la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas dans un habitat aride au sud de Tébessa"

Présenté par : BOUGUESSA Meriem

Jury :

NEFFAR Souad : Professeur, Université de Tébessa – Promotrice

BOUDJABI Sonia : Professeur, Université de Tébessa – Présidente

GHEDABNIA Karima : Maitre-Assistant A, Université de Tébessa – Examinatrice

Année universitaire : 2024/2025

Date de soutenance :11-06-2025

Dédicaces

Louange à Allah qui a conduit les années de mes études jusqu'à leur enchaînement, qui a veillé sur les fleurs de mon rêve jusqu'à leur joie d'achèvement. Par Son aide seule, j'ai cueilli le fruit d'un long effort.

Les mots se précipitent, les phrases se bousculent pour tisser un collier de remerciement qui ne mérite que vous. Aucun dictionnaire ne contient un mot de remerciement ou une expression de gratitude capable d'exprimer ce qu'il y a dans le cœur. Mais peut-être que mes prières frapperont aux portes du ciel et seront plus éloquentes que mes lettres.

À mon pilier fixe et mon espoir éternel : à mon père – que Dieu lui fasse miséricorde,

à celui qui m'a appris à tenir le stylo et est parti avant de cueillir les fruits de ce qu'il a semé, de son effort, sans lequel, après Dieu, je ne serais rien. À toi, la gratitude sincère et la prière continue.

À mon sourire chaleureux : ma mère,

à celle qui a rassuré mes peurs, planté des lampes sur mon chemin par ses prières, et m'a offert la lumière sans rien attendre en retour. Merci. Sans toi, cette réussite n'aurait jamais vu le jour.

À mes frères et sœurs,

qui furent la chaleur au cœur du froid, le soutien quand les tempêtes devenaient rudes. Sans votre appui, je n'aurais pu avancer pas après pas sur ce chemin.

À ma chère professeure Neffar Souad,

aue puis-je dire sinon : Gloire à Celui qui a semé ton amour dans mon cœur. Tu étais plus qu'une encadrante, tu étais la bonne parole dans les moments d'hésitation. Merci.

Aux amis des instants,

à tous ceux qui m'ont soutenue ou ont prié pour moi même en secret – merci du fond du cœur. Je n'oublierai jamais cette belle marque

Remerciements

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم :(مَن صَنَع إِلَيْكُمْ مَعْرُوفًا فَكَافِئُوهُ،فَإِنْ لَم تَجِدُوامَا تُكَافِئُونَهُ فَادْعُوا لَه حَتَّى تَرَوْا أَنَّكُم قَد كَافَأْتُمُوه).

Dans ce voyage de recherche, où se croisent questions et doutes, et où le savoir porte un fardeau souvent indescriptible, il fallait une main tendue, une parole éclairante, des cœurs nobles qui m'ont soutenue sans attendre de remerciements.

Louange à mon Seigneur, source de toute réussite, celui qui m'a inspiré la patience lorsque le chemin s'est allongé, et qui a planté en mon cœur la graine d'un effort profond.

À ma directrice, Mme Neffar Souad, vous as été plus qu'une guide, un refuge dans les moments d'incertitude, par votre sagesse et votre sincérité, vous m'avez soutenue avec discrétion et douceur, chaque remarque de votre part a eu un impact, chaque conseil une vraie valeur. Que Dieu vous récompense amplement, bénisse votre savoir et votre générosité.

À la commission d'évaluation, Professeur Boudjabi Sonia et Dr. Ghedabnia Karima. Merci d'avoir consacré votre temps et votre savoir, et d'avoir honoré mon travail de votre présence remarquable, vos paroles ont été une lumière au bout du chemin.

À tous les professeurs du domaine de l'écologie et de l'environnement,

à ceux qui ont été une lumière guidante, à ceux qui n'ont jamais hésité à partager leur savoir ni leurs conseils…Qu'Allah vous récompense grandement, qu'Il bénisse votre savoir et vos efforts, et qu'Il place tout ce que vous avez offert dans la balance de vos bonnes actions

Je n'oublie pas l'équipe du laboratoire, Mme Manel, Mme Karima, Mlle Shaima et tous ceux qui m'ont aidée en silence, vous avez été des piliers invisibles, mais votre impact a été immense. Merci du fond du cœur, vous avez une part certaine dans ce succès.

Résumé:

Cette étude évalue la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) en fonction de l'âge des arbres, dans la station de Ghar Abada (Tébessa). Les échantillons de sol prélevés sous le canopée de l'arbre ont subi quelques analyses physico-chimiques et biologiques. Les paramètres déterminés sont le pH, la conductivité électrique (CE) ,le calcaire total, le carbone et l'analyse granulométrique, et la biomasse microbienne.Les résultats ont montré une biomasse microbienne plus élevée chez les jeunes arbres (0,38 %) *vs* 0,22% chez les vieux, sans différence statistique significative (p= 0,063) . Le test de Student a révélé une différence significative pour le pH (p=0,001) , la CE (p= 0,000) et aucune pour le calcaire et lamatière organique (p> 0,05)

Des corrélations ont été observées également observées entre la biomasse et certains paramètres du sol, positives avec l'argile et la matière organique, et négatives avec la salinité.Ces résultats suggèrent que les jeunes racines favorisent un environnement plus actif biologiquement, soulignant l'importance de la microflore dans les écosystèmes steppiques.

Mots-clés : Biomasse microbienne – Rhizosphère – Pistachier de l'Atlas– Âge des arbres — Écosystèmes steppiques – Tébessa.

Abstract:

This study evaluates the microbial biomass in the rhizosphere of the Atlas pistachio tree (*Pistacia atlantica* Desf.) based on tree age at the GharAbada station (Tebessa). Soil samples collected under the tree canopy were subjected to various physico-chemical and biological analyses. The parameters include pH, electrical conductivity (EC), total limestone, organic matter, and particle size distribution, and microbial biomass .Results showed higher microbial biomass in young trees (0.38%) compared to older ones (0.22%), without a statistically significant difference (p = 0.063). Student's t-test revealed significant differences in pH (p = 0.001) and EC (p = 0.000), but not for limestone or organic matter. Correlations were observed between microbial biomass and some soil parameters: positive with clay content and organic matter, and negative with salinity. These findings suggest that young roots promote a more biologically active environment, highlighting the role of microflora in the steppes ecosystems.

Key words: Microbial biomass – Rhizosphere – Atlas pistachio – Tree age – Steppe ecosystems –Tébessa.

الملخص

تُقيِّم هذه الدراسة كمية الكتلة الحيوية الميكروبية في منطقة جذور شجرة الفستق الأطلسي (***Pistacia atlantica* Desf**) حسب عمر الأشجار، في محطة غار عبادة (تبسة). وقد خضعت عينات التربة المأخوذة من تحت مظلة الشجرة لتحاليل فيزيائية-كيميائية وبيولوجية، شملت قياس الحموضة ، الناقلية الكهربائية، الكلس الكلي، المادة العضوية، والتحليل الحبيبي ، الكتلة الحيوية الميكروبية.

أظهرت النتائج كتلة حيوية ميكروبية أعلى لدى الأشجار الصغيرة (0,38 %)مقارنة بالأشجار الكبيرة (0,22 %)، دون وجود فرق إحصائي معنوي (**p = 0,063**). وأظهر اختبار "**Student**" فرقًا معنويًا في الحموضة (**p = 0,001**) والتوصيل الكهربائي (**p = 0,000**)، بينما لم يُسجل فرق معنوي في الكلس أو المادة العضوية.

كما لوحظت ارتباطات بين الكتلة الحيوية وبعض خصائص التربة، كانت إيجابية مع نسبة الطين والمادة العضوية، وسلبية مع الملوحة. وتشير هذه النتائج إلى أن الجذور الفتية تهيئ بيئة بيولوجية أكثر نشاطًا، مما يبرز أهمية الكائنات الحية الدقيقة في النظم البيئية السهبية.

الكلمات المفتاحية :الكتلة الحيوية الميكروبية – منطقة الجذور– الفستق الأطلسي– عمر الأشجار– النظم البيئية السهبية– تبسة.

.

Sommaire

Résumés…… ***i***

Sommaire…….. ***iii***

Liste des figure et des tableaux…….… ***v***

Introduction générale……..… ***1***

Chapitre 1 : Matériels et méthodes

1. *Apercu sur la région d'étude*…….…….. ***10***

1.1. *Situation géographique* ……. ***10***

1.2. *Sol*……..…… ***10***

1.3. *Climat*……. ***11***

1.4. *Relief*…… ***12***

1.5. *Vegetation* ……. ***13***

2. *Choix de station d'étude* ……..…… ***13***

3. *Prélèvement et analyse des échantillons de sol*……. ***14***

4*. Analyses de laboratoire* …… ***14***

4.1. *Analyse biologique :Estimation de la biomasse microbienne*…….. ***14***

5. *Analyse statistique*…… ***16***

Chapitre 2: Résultats

1. *Caractérisation physico-chimiques des sols de la rhizosphère du pistachier*……..……... ***18***

2. *Estimation de la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier*…… ***19***

3.*Corrélation entre la biomasse microbienne et les paramètres du sol*…….. ***20***

Chapitre 3 : Discussion générale et conclusion

Discussion générale etconclusion …… ***23***

Références bibliographiques…… ***28***

Annexes…… ***35***

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Figure 1	Les fonctions du microbiote racinaire dans la survie des plantes (Fuente Cantó *et al*., 2020).	**3**
Figure 2	Carte de la situation géographique de la wilaya de Tébessa.	**10**
Figure 3	Diagramme ombrothermique de la région d'étude (1972- 2018)	**11**
Figure 4	Carte topographique de la wilaya de Tébessa	**12**
Figure 5	Localisation géographique la station d'étude Image satellitaire Google Earth, (clichés Bouguessa (2025), N : Versant Nord, S : Versant Sud).	**13**
Figure 6	illustrant les étapes expérimentales de l'estimation de la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas,(Cliché Bouguessa, 2025).	**16**
Figure 7	Box plots représentant la variation de la biomasse microbienne estimée dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas(JP: Jeune pistachier, VP: Vieux pistachier) .	**19**
Figure 8	Carte de chaleur des corrélations (coefficients de Pearson) entre les différents paramètres du sol sous climat semi- aride (Corrélations marquées à P<0,05). (pH : Potentiel d'hydrogène, CE : la conductivité electrique (µS/cm), C totale : calcaire total(carbonates) (%), C : Le carbone organique(%), MO : Matière organique(%); BC: Carbone de la biomasse microbienne(%)).	**20**

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
Tableau 1.	Caractéristiques physico-chimiques des echantillons de sol collectés dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas dans la station de Ghar Abada.	**18**

Introduction générale

1. En quoi consiste la biomasse microbienne ?

Le concept de biomasse microbienne (BM) fait référence à la fraction vivante de la matière organique, considérant l'ensemble des microorganismes du sol comme un tout (Chaussod *et al.,* 1996). Par simple définition, il s'agit de la quantité totale de matière organique constituée par les micro-organismes présents dans un environnement donné, dont la taille est inférieure à 5-10 µm (Joergensen,1995). On estime notamment que la diversité bactérienne des sols varie entre 104 et 109 espèces et qu'un gramme de sol compte plus de 109 micro-organismes (Van Elsas *et al.,* 2007). Ces micro-organismes constitués principalement de bactéries, d'archées et de champignons, jouent un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques et la structuration des sols. En d'autres termes, c'est la masse de "carbone vivant" contenue dans les microbes du sol (Atlas,2004), composée en majorité de micro-organismes chimio-organotrophes (Tate*,* 2020).

La biomasse microbienne du sol constitue environ 1 à 4% de la matière organique du sol (Brookes, 2001). Cet indicateur biologique est généralement exprimé en milligrammes de carbone par kilogramme de sol ou en microgrammes de carbone par gramme de poids sec. Son intérêt réside dans sa fonction de réservoir de nutriments, son rôle dans la structuration et la stabilisation du sol, ainsi que marqueur écologique (Sylvia *et al*., 2005 ; Horwath., 2017). Selon Insam et Domsch (1988), la majorité de la communauté microbienne peut être dormante à tout moment dans la plupart des sols, prête à répondre à mesure que les conditions deviennent favorables.

2.Importance des microorganismes dans les sols

2.1. Structure et agrégation du sol

Ils contribuent à la formation des agrégats du sol en secrétant des substances collantes qui agglomèrent les particules minérales et organiques, cas de la resine (Atlas, 2004). Les filaments fongiques peuvent lier mécaniquement les particules du sol entre elles (Godwin, 1992). favorisant ainsi l'infiltration de l'eau, l'aération du sol et la rétention des nutriments (Tisdall *et al.,* 1982).

2.2.Cycles biogéochimiques

- La biomasse microbienne joue un rôle majeur dans les processus biochimiques qui se déroulent dans cet environnement. Elle a une influence décisive sur les processus métaboliques du sol et se comporte comme un réservoir d'éléments minéraux : elle les maintient dans les horizons supérieurs du sol, les protège du lessivage et les restitue progressivement aux plantes (Gobat *et al*., 2010), surtout l'azote (Ollivier *et al*., 2011).
- Elle est considérée comme le principal facteur affectant la fertilité du sol (Singh, 2024) car lors de la mort et de la lyse des cellules microbiennes, leur contenu cytoplasmique enrichit le sol en nutriments (Lian *et al*., 2013 *in* Lame *et al.,* 2015).
- La population microbienne remplit une fonction essentielle et obligatoire dans le « recyclage » des matières organiques retournées au sol (Godwin,1992 ; Chantigny et Angers, 2005).

2.3. Interactions avec les plantes

Les micro-organismes de la rhizosphère des plantes dominent le cycle des nutriments dans les systèmes sol-plante (Fig. 1). Ils augmentent la capacité des plantes à acquérir des nutriments du sol soit en augmentant l'étendue du système racinaire (par exemple par l'intermédiaire d'hyphes fongiques) soit en solubilisant des macronutriments tels que le phosphore ou le soufre (Smith et Read, 1997 *in* Mukerji *et al.,* 2006).

-Les micro-organismes bénéfiques associés aux plantes peuvent avoir des effets positifs sur la germination des graines, la vigueur des plantules, la nutrition, la croissance et le développement des plantes et la productivité (Masson et Simonin *et al*., 2022). Selon Davet (1996), ils protègent les plantes contre les maladies en produisant des substances antimicrobiennes ou en entrant en compétition avec les agents pathogènes.

-Les interactions entre les microbes végétaux jouent un rôle clé dans les processus écosystémiques cruciaux, à savoir : séquestration du carbone, agrégation du sol et cycle des nutriments dans l'écosystème de la rhizosphère (Singh et al., 2004 *in* Sharma *et al.,* 2021).

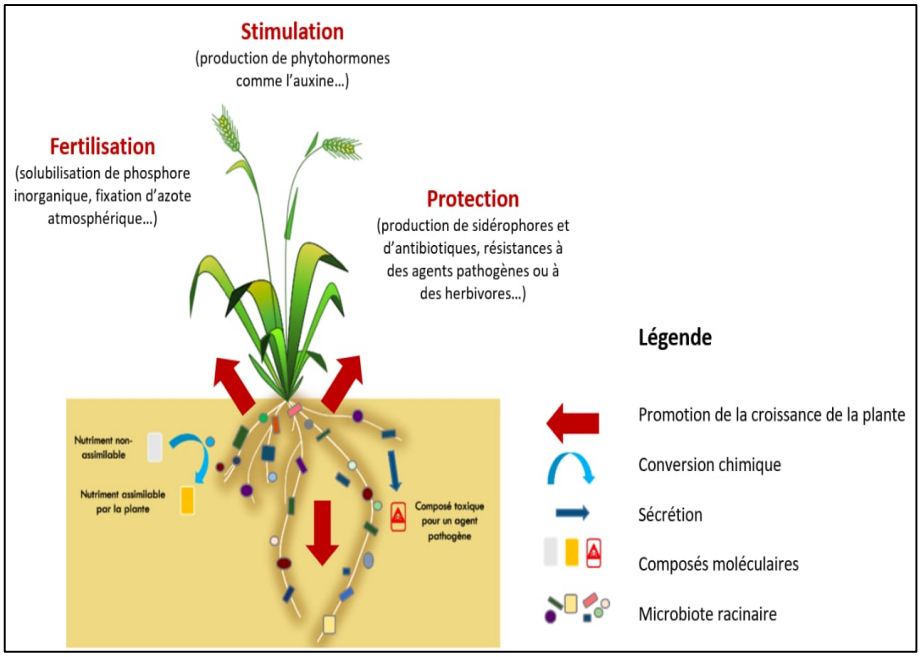


Figure 1. Les fonctions du microbiote racinaire dans la survie des plantes (Masson et Simonin *et al*., 2022).

-Par leur activité intense dans la rhizosphère, les micro-organismes affectent le pH, l'O_2, la tension, le CO_2, la concentration et influencent peut-être aussi la croissance des plantes. Des produits microbiens tels que les phytotoxines, libérés dans la rhizosphère, peuvent affecter directement la croissance des plantes (Malviya *et al.,* 2020 *in* Sharma *et al.,* 2021).

3. Facteurs influençant la biomasse microbienne dans le sol

3.1. Facteurs abiotiques

3.1.1. Facteurs edaphiques

La structure et l'activité de la communauté microbienne du sol dépendent dans une large mesure de l'état de leur habitat. Cet habitat est peut-être mieux envisagé comme une matrice complexe avec des pores et des agrégats de sol de différentes tailles (Sylvia *et al.,* 2005 *in* Dixon et Tilston, 2010). Nous en citons :

-La texture : La taille des particules du sol (sable, limon, argile) influence la porosité, la capacité de rétention en eau et la disponibilité des nutriments, impactant ainsi la croissance microbienne.

-La structure: La structure du sol, définie par l'arrangement des particules en agrégats, affecte l'aération, l'infiltration de l'eau et les habitats disponibles pour les micro-organismes.

- La teneur en matière organique: La matière organique constitue une source de carbone et d'énergie pour les micro-organismes, et sa décomposition influence la disponibilité en nutriments .

-Le pH: Le pH du sol affecte la solubilité des minéraux, la disponibilité des nutriments et la diversité des espèces microbiennes *(*Paul et Clark, 1996). Il a une influence sur la composition microbienne du sol et sur certains aspects de l'activité des microorganismes. Il joue aussi un rôle dans les phénomènes d'adhésion aux particules d'argile *(*Davet, 1996). À titre d'exemple, les champignons sont généralement prépondérants dans les sols acides tandis que les bactéries prédominent dans les sols neutres ou légèrement alcalins. Les études de croissance réalisées au laboratoire montrent que la majorité des champignons est en fait capable de prospérer dans une large gamme de pH , comprise en moyenne entre 3,5 et 8,5 . Leur relative abondance dans les sols acides n'est due qu'à la difficulté pour la plupart des bactéries de se développer à des pH inférieurs à 6,5. Les Actinomycètes , qui ont un rôle antagoniste important vis à vis des champignons , sont particulièrement sensibles à l'acidité (Davet, 1996). Le pH est aussi un filtre environnemental important, ainsi, les sols acides ont une faible biomasse microbienne (Lauber *et al.,* 2009).

-La teneur en eau: L'eau est essentielle à la vie microbienne, mais un excès peut entraîner des conditions anaérobies défavorables à certains groupes microbiens (Paul et Clark, 1996). Elle a aussi de multiples effets mécaniques ou physiques : abondante , l'eau augmente la disponibilité des éléments solubles et facilite les déplacements des micro-organismes mobiles à la recherche de substrats ou de proies. Rare, elle permet de meilleurs échanges gazeux avec l'atmosphère extérieure et un renouvellement plus rapide de l'oxygène. Par conséquent, les variations de la teneur en eau ont des répercussions considérables sur l'activité biologique du sol.

- Le dioxyde de carbone : La proportion de dioxyde de carbone dans l'atmosphère du sol est généralement de l'ordre de 0,3 à 5 %, mais elle peut atteindre ou dépasser 20 % lorsque

l'activité biologique est intense, notamment au voisinage des racines ou d'une source importante de matière organique (Davet, 1996). Dans l'atmosphère extérieure, la teneur en dioxyde de carbone est seulement 0,035 %. La réponse des micro-organismes au dioxyde de carbone est très variable. Par exemple, les bactéries fixatrices d'azote fonctionnent moins efficacement lorsque sa concentration augmente. En revanche, les bactéries nitrifiantes préfèrent des teneurs de l'ordre de 0,15 % (Davet, 1996).

-L'ammoniac : Dans les sols, l'ammoniac est un élément clé dans le cycle de l'azote. Il est une source directe d'azote pour les plantes sous forme de nitrates, après un processus de transformation effectué par des bactéries nitrifiantes. De plus, l'ammoniac peut être utilisé comme engrais pour améliorer la fertilité du sol. Cependant, en excès, il peut avoir des effets négatifs en acidifiant le sol, ce qui perturbe la croissance des plantes.(Galloway *et al.,* 2008).

3.1.2. Facteurs climatiques

-La température :

Chaque micro-organisme a une température minimale et maximale tolérable. Il existe trois températures critiques pour les micro-organismes qui sont généralement déterminées par la température à laquelle les enzymes du micro-organisme fonctionnent. Ces trois températures critiques (également appelées températures cardinales) sont les suivantes :

1. La température de croissance minimale : la température la plus basse à laquelle les cellules peuvent encore se diviser.
2. La température de croissance maximale : la température la plus élevée à laquelle les cellules peuvent encore se diviser.
3. La température de croissance optimale : la température à laquelle les cellules se divisent le plus rapidementl (https://www.labster.com).

Lorsque la température est trop basse, les réactions biochimiques ralentissent, ce qui limite la croissance cellulaire. À l'inverse, des températures trop élevées peuvent dénaturer les protéines et perturber les membranes cellulaires, ce qui entrave la division cellulaire et peut provoquer la mort cellulaire (Madigan *et al.,* 2008).

Selon Stolp (1988), les organismes sont divisés en psychrophiles, mésophiles et thermophiles

1. Les organismes psychrophiles préfèrent des températures inférieures à 20 °C.

2. Les mésophiles, comprenant la plupart des bactéries vivant dans les sols et les eaux, se développent mieux à des températures comprises entre 25 et 40 °C.
3. Les thermophiles sont adaptés à des températures plus élevées et préfèrent des températures supérieures à 55 °C.

3.2. Facteurs biotiques

3.2.1. La végétation

- Le type de végétation : Les racines de la plante , via la rhizodéposition , sont la source d'énergie et de nourriture pour les microorganismes présents dans la rhizosphère (Whipps, 1990).

Selon Wela *et al*. (2022), la diversité végétale peut accroître l'efficacité métabolique des micro-organismes et réduire leur quotient métabolique (rapport de la respiration à la biomasse), en fournissant des ressources variées à travers les exsudats racinaires et la litière végétale. Des analyses globales ont indiqué que la biomasse microbienne, le rapport champignons / bactéries, et la respiration microbienne augmentaient dans les sols cultivés avec des mélanges de plantes par rapport aux monocultures. Ce schéma a été observé dans différents types d'écosystèmes tels que les forêts, les prairies et les champs agricoles.

La biomasse microbienne du sol peut augmenter avec la diversité végétale grâce à une plus grande quantité de carbone et de ressources nutritives disponibles pour les micro-organismes, résultant d'une augmentation de la chute de la litière aérienne et de la mortalité des racines fines dans les communautés végétales riches en espèces .De plus, le mélange d'espèces végétales ayant des fonctions différentes conduit à des exsudats racinaires diversifiés, ce qui favorise à son tour la diversité microbienne et l'augmentation de la biomasse (Chen *et al* .,2019).

-La rhizosphère

La rhizosphère est considérée comme un « point chaud » pour la colonisation et l'activité microbiennes (Lal, 2004), car d'un coté, contrairement au sol, où les sources de carbone organique disponibles ne sont qu'à de faibles concentrations, les rhizosphères sont alimentées par des concentrations plus élevées de sources de nutriments générées pendant la photosynthèse des plantes (Mukerji *et al* .,2006) , et d'un autre coté, comparé au sol sans

racines, le nombre de micro-organismes à proximité ou sur les racines est considérablement plus élevé, généralement de deux ordres de grandeur ou plus. Le rapport R/S est défini comme le rapport entre le nombre d'organismes dans la rhizosphère et le nombre dans le sol adjacent. Il varie selon le type de sol et de plante (Stolp, 1988). Certaines bactéries et certains champignons ont tendance à se rassembler dans le sol immédiatement adjacent aux racines des plantes (la rhizosphère), où ils peuvent se nourrir des sucres que les racines des plantes exsudent ou s'associer physiquement au système racinaire de la plante et échanger des sucres et des nutriments dans une relation (généralement) mutualiste (mycorhizes) (Dixon et Tilston,2010).

3.2.3. Facteurs anthropiques

Selon Lal (2004) , les facteurs anthropiques incluent les pratiques agricoles, tels que, le labour, la fertilisation, l'irrigation et l'utilisation de pesticides qui modifient les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, impactant ainsi la biomasse microbienne ; ainsi que les polluants qui peuvent inhiber l'activité microbienne ou modifier la composition des communautés microbiennes.

La biomasse microbienne du sol constitue l'un des indicateurs biologiques les plus sensibles et les plus précoces de la qualité du sol. En milieu aride, où les contraintes climatiques et édaphiques limitent fortement la productivité des sols, cette fraction vivante de la matière organique joue un rôle fondamental dans le maintien de la fertilité et la résilience des écosystèmes.

Le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*), espèce patrimoniale des régions steppiques du bassin méditerranéen, est confronté à des conditions pédoclimatiques rigoureuses. Sa survie et son développement pourraient être étroitement liés à l'activité microbienne de sa rhizosphère.

Cependant, en dépit de l'importance écologique de cette interaction, peu d'études ont été consacrées à l'évaluation de la biomasse microbienne associée au pistachier de l'Atlas dans les environnements naturels d'Algérie.

Dans ce contexte, une question fondamentale se pose : comment la biomasse microbienne varie-t-elle dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas en fonction de l'âge des arbres et des conditions édaphiques locales ?

Dans le but de répondre à cette question, cette recherche a pour objectif de quantifier la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas, en utilisant la méthode de fumigation-extraction. Elle vise spécifiquement à :

- Estimer la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas en fonction de l'âge des arbres ;
- Analyser l'influence des principales propriétés physico-chimiques du sol sur la biomasse microbienne.

Ce mémoire est articulé en introduction générale et trois parties principales :

- Chapitre 1 : dans lequel la partie « Matériel et méthodes » est décrite incluant la présentation de la zone d'étude, l'echantillonnage et les analyses du sol.
- Chapitre 2 : présentation des résultats
- Chapitre 3 : discussion générale et conclusion, suivi des références bibliographiques et de l'annexe.

Chapitre 01:
Matériel et méthode

1.Apercu sur la région d'étude

1.1. Situation géographique

Le présent travail a été mené dans la région de Tébessa, située à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, à proximité de la frontière tunisienne.. Elle est bordée au Nord par la wilaya de Souk-Ahras, au Nord-Ouest par celle d'Oum El Bouaghi, à l'Ouest par Khenchela et au Sud par la wilaya d'El Oued. Cette wilaya s'étend sur une superficie d'environ 14 227 km²(Fig .2).

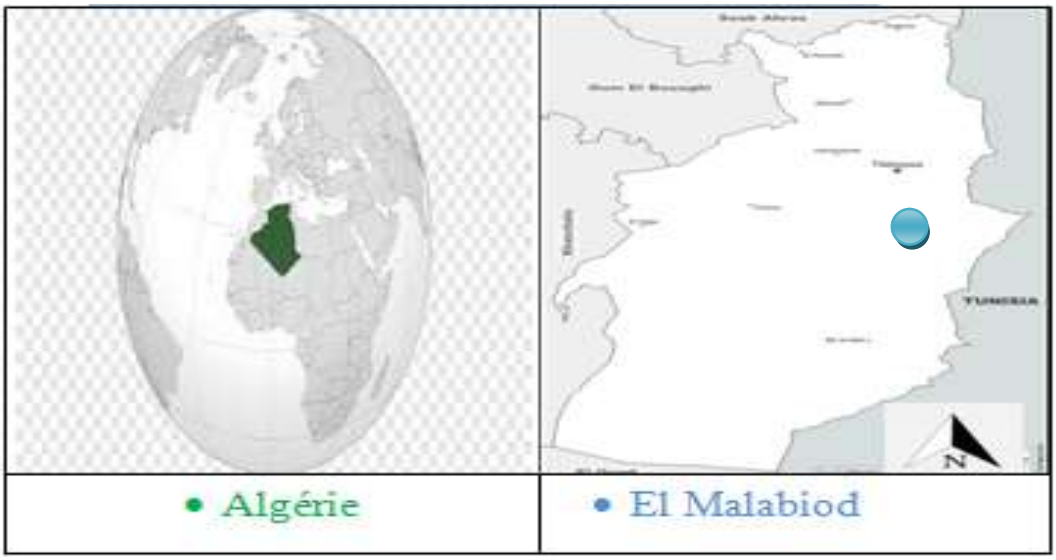


Figure 2. Carte de la localisation de la région et de la station d'étude.

1.2.Sol

D'après Rouabhia *et al.* (2010), la diversité des sols dans la commune d'El Malabiod se traduit par plusieurs types de sols, classés selon leur texture, leur composition chimique et leur niveau de fertilité. Les sols des zones basses affichent généralement une texture argilo-limoneuse à limono-sableuse, avec une teneur faible à moyenne en matière organique, une alcalinité marquée et une salinité variable selon les apports hydriques et les pratiques d'irrigation.Dans la partie Sud de la commune, les sols présentent un faible degré d'évolution, étant parfois gypsifères ou légèrement sodiques.

1.3. Climat

Selon l`Agence Nationale de Développement de l`investissement(2015), la wilaya de Tébessa se distingue par quatre (04) étages bioclimatiques : le sub-humide (400 à 500 mm), limité aux sommets de Djebel-Serdies et DjebelBouroumane; le semi-aride (300 à 400 mm/an) couvranttoute la partie Nord de la wilaya; le Sub-aride (200 à 300 mm/an) qui couvre les plateaux steppiques de Oum-Ali,Saf-Saf-El-Oussra, Thlidjene et Bir El-Ater et enfin l'aride ou saharien doux (<200 mm/an) qui commence et s'étend au-delà de l'AtlasSaharien et s'étale aux plateaux de Negrine et Ferkane.

Sur la base des données climatologiques extraites du mémoire de Redjeb et Tichati (2019) couvrant une période de 46 ans (1972–2018), la température moyenne annuelle est de 15,85°Cavec de précipitations de 371mm. Le diagramme ombrothermique(Fig.3)separel`année en 2 periodes :une période sèche qui s'étend du mois de juin au mois d'octobre, et une période humide du mois de novembre au mois de mai. L'indice de Martonne est égal à 14,44.

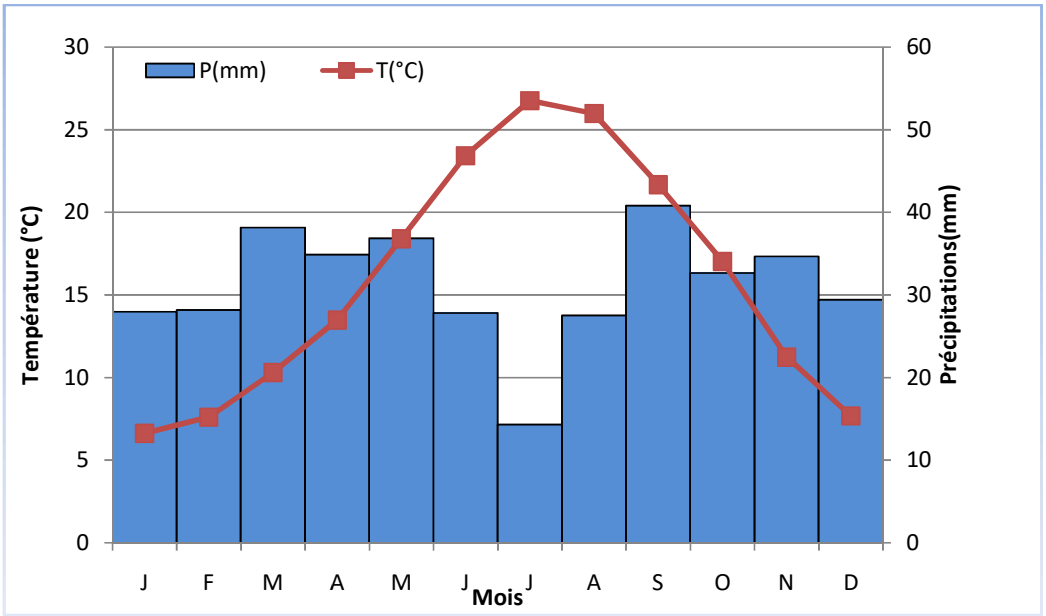


Figure 3. Diagramme ombrothermique de la région d'étude (1972- 2018)

1.4. Relief

Dans la région Nord du territoire de la wilaya de Tébessa, le relief se présente sous forme de massifs isolés aux formes escarpées (Djebel Ouenza et Djebel Harraba), ainsi que de dômes peu saillants (Djebel Dyr), qui s'élèvent au dessus de vastes plaines dont l'altitude oscille entre 400 et 510m(Defaflia,2007). La figure 4illustre la répartition de l'altitude à travers les différentes communes de la wilaya, avec une altitude minimale de 210 mètres et une altitude maximale de 1637 mètres. Cette diversité topographique a une influence directe sur le climat, les sols et la couverture végétale de la région.

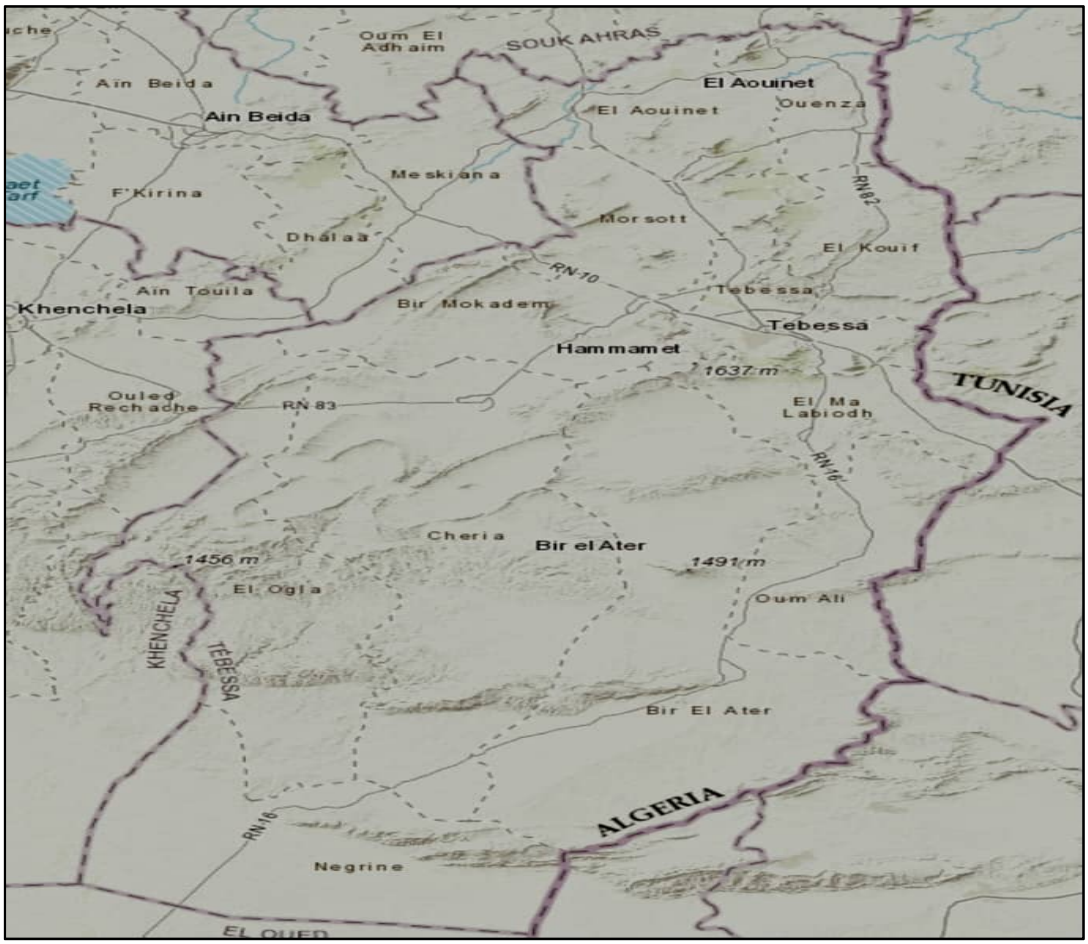


Figure 4. Carte topographique de la wilaya de Tébessa

1.5. Vegetation

La végétation steppique est classée en plusieurs groupes écologiques selon le type de sol : les steppes herbacées dominées par *Macrochloatenacissima* et *Lygeum spartum*sur sols argileux, les steppes sableuses dominées par les espèces :*Aristida pungens*, et les steppes halophiles qui incluent *Atriplex halimus* et *Salsola vermiculata*(Macheroum*et al.,*2021).

2.Choix de station d'étude

Étant donné que le but de cette étude est d'estimer la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas, la station de Ghar Abada constitue un site d'excellence qui abrite une population suffisante facilitant cette étude (Fig.5). Cette station a pour coordonnées géographiques : latitude : 35°6.3710' et 35°6.4460' Nord, longitude 8°17.3440' et 8°16.8640' Est, avec une altitude comprise entre 1041,5 et 1066 mètres, témoignant d'un relief hétérogène. Le secteur Nord s'étend sur environ 7,52 hectares, tandis que la zone Sud couvre 10,8 hectares, avec des pentes oscillant entre 35 % et 45 %.



Figure 5. Localisation géographique la station d'étude image satellitaire Google Earth, (clichés Bouguessa, 2025), N : Versant Nord, S : Versant Sud).

3. Prélèvement et analyse des échantillons de sol

Dans la station de Ghar Abada situé à El Malabiod, des échantillons de sols sont prelevés à une profondeur de 30 cm sous de jeunes et vieux sujets de pistachier pendant le mois de Décembre 2025.

Sous chaque arbre, trois sous échantillons sont prelevés selon un triangle positionné sous la canopée. Un total de dix arbres a été sélectionné : cinq arbres jeunes et cinq arbres âgés. Les échantillons recueillis ont été ensuite mélangés selon le groupe d'âge (jeunes, vieux), afin d'obtenir trois échantillons composites représentatifs.

4. Analyses de laboratoire

A l`aide d`un tamis de 2 mm, les echantillons seches a l`air ambiant pendant plusieurs jours sont tamises pour obtenir une terre fine qui fera l`objet de quelques analyses physico-chimiques et biologique (Annexe) ، Parmi ces analyses, nous citons :

- pH : déterminé dans une suspension sol –eau de 1/5.
- Conductivité électrique (CE) : rapport sol/eau de 1/5.
- Calcaire total (Dermech *et al*., 1982)
- Carbone organique : réalisée selon la méthode de Walkley & Black (1934).
- Analyse granulométrique : méthode approximative de la bouteille.

4.1. Analyse biologique : Estimation de la biomasse microbienne

Cette analyse représente l'une des plus importantes de cette étude, en raison de son rôle essentiel dans l'évaluation de l'activité microbienne du sol, considérée comme un indicateur direct de sa fertilité et de sa vitalité. La méthode adoptée repose sur la fumigation-extraction, selon le protocole décrit par Chaussod (1996), qui consiste à comparer la quantité de carbone organique extractible entre un sol fumigé et un sol témoin non fumigé.

Les étapes principales sont les suivantes :

- Séchage des échantillons à 105°C pendant 24 heures, puis tamisage à 2 mm.(Fig. 6A)
- Fumigation de 4 g de sol à l'aide de chloroforme dans un dessiccateur fermé, pendant 24 heures à 20°C(Fig. 6B) .

- Mélanger l'échantillon de sol avec 20 ml de sulfate de potassium(K_2SO_4) à une molarité de 0,05 N .
- Ce mélange est agité pendant un peu plus d'une demi-heure (45 minutes) puis centrifugé dans des tubes à essai pendant un quart d'heure (15minutes) à une vitesse atteignant environ 4500 tours/minute(Fig. 6C) .
- Récuperer le surnageant contenant le carbone extractible(Fig. 6D) .
- Le surnageant obtenu est séché à 50°C / 24h(Fig. 6E)
- Dosage du carbone dans le résidu par la méthode de Walkley et Black (1934) (Fig. 6F)
- Calibration colorimétrique : les teintes reflètent différentes concentrations de carbone organique(Fig. 6G).

La quantité de carbone microbien est ensuite calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Bc = (CF-CNF) /Kec$$

Où :

- Bc : carbone microbien (%)
- CF : teneur en carbone dans le sol fumigé
- CNF : teneur en carbone dans le sol non fumigé
- Kec : coefficient d'efficacité d'extraction (=0,38)



Figure 6. illustrant les étapes expérimentales de l'estimation de la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas(Cliché Bouguessa, 2025).

5- Analyse statistique

Les valeurs des résultats sont représentées par la moyenne et l'écartype. Un test de Student a été effectué pour comparer les moyennes des differents parametres. Le test de corrélation de Pearson a été réalisé afin de voir les relations binaires entre les paramètres physico-chimiques et le biomasse microbienne**.**

Chapitre 02: Résultats

1-Caractérisation physico-chimiques des sols de la rhizosphère du pistachier

Les résulats de l'analyse des échantillons de sol collectés dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas dans la station de Ghar Abada (Tebessa) sont indiqués dans le tableau 1.

Dans l'ensemble, les echantillons ont révélé un pH légèrement alcalin avec une valeur moyenne de 7,99 ± 0,027 chez les jeunes sujets *vs* 7,77 ± 0,09 chez les vieux sujets. Le test de Student a révélé une différence significative entre les 2 groupes (JP *vs* JP) avec p= 0, 001.

Laconductivité électrique est significativement plus élevée (p= 0,000) dans l'échantillon "Vieux" (333 ± 29,67 µS/cm) comparé aux jeunes sujets (228,4 ± 12,22 µS/cm).

Le taux de calcaire total est nettement plus élevé dans le sol "Vieux" (33,47 ± 13,25 %) que dans "Jeune" (21,29 ± 16,25 %), mais la différence est statistiquement non significative (p= 0,828).

Concernant la matière organique, les jeunes sujets ont enregistré une valeur moyenne de2,80±0,90légèrement plus elevée que celle signalée chez les vieux 2,26±0,709, mais statistiquement la différence est non significative (p= 0,059).

Concernant les textures du sol, seul le pourcentage de limon a montré une différence statistiquement significative entre les groupes (p = 0,028), tandis que les pourcentages d'argile et de sable, bien que variables, ne présentent pas de différences significatives (p > 0,05).

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des echantillons de sol collectés dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas dans la station de Ghar Abada.

Paramètre du sol		Jeunes sujets	Vieux sujets	Valeur de p
pH (1/5)		7,99±0,027	7,77±0,099	0,001
la conductivité electrique(µS/cm)		228,4±12,22	333±29,67	0,000
Calcaire total(%)		21,29±16,25	33,47±13,25	0,828
Carbone organique(%)		1,63±0.533	1,31±0.415	0,467
Matière organique (%)		2,80±0,902	2,26±0,709	0,474
Granulométrie	Sable(%)	21,39± 9,10	19,08±9,44	0,339

	Limon(%)	44,18 ±1,54	51,80±6,17	0,028
	Argile(%)	34,42± 8,63	29,12±9,44	0,704
Texture		Limon argileux	Limon argileux fine	////

2- Estimation de la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier

La figure 7 illustre la variation de la biomasse microbienne moyenne au niveau de la rhizosphère des pistachiers. Chez les jeunes pistachiers, une biomasse moyenne de 0,38 ± 0,10% (min : 0,26 – max : 0,47) a été enregistrée. En revanche, les vieux pistachiers présentent une biomasse moyenne estimée à 0,22 ± 0,12% (min : 0,08 – max : 0,32). L'analyse statistique à l'aide du test de Student n'a pas mis en évidence une différence significative entre les deux groupes (p = 0,063).

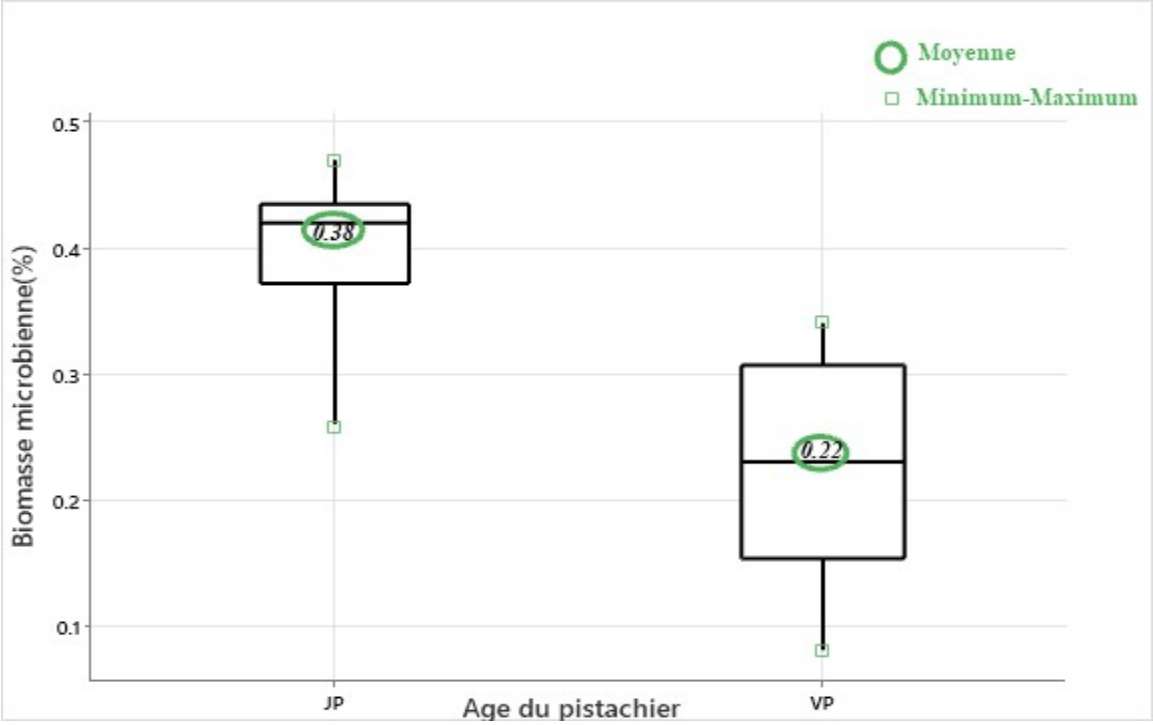


Figure7 . Box plots représentant la variation de la biomasse microbienne estimée dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas(JP: Jeune pistachier, VP: Vieux pistachier) .

3- Corrélation entre la biomasse microbienne et les paramètres du sol

La matrice de corrélation (figure .8) a permis de distinguer plusieurs couples de paramètres corrélés significativement au niveau p< 0,05.Les corrélations négatives incluent les couples suivants :pH - CE(r = -0,86), CE- BM (r = -0,77),argile -sable (r = -0,77), limon -BM(r = -0,64), tandis que les corrélations positives et significatives se sont manifestées entre la CE et le limon (r= 0,64), l'argile et BM (r = 0,75), la MO et C(r = 1,00).

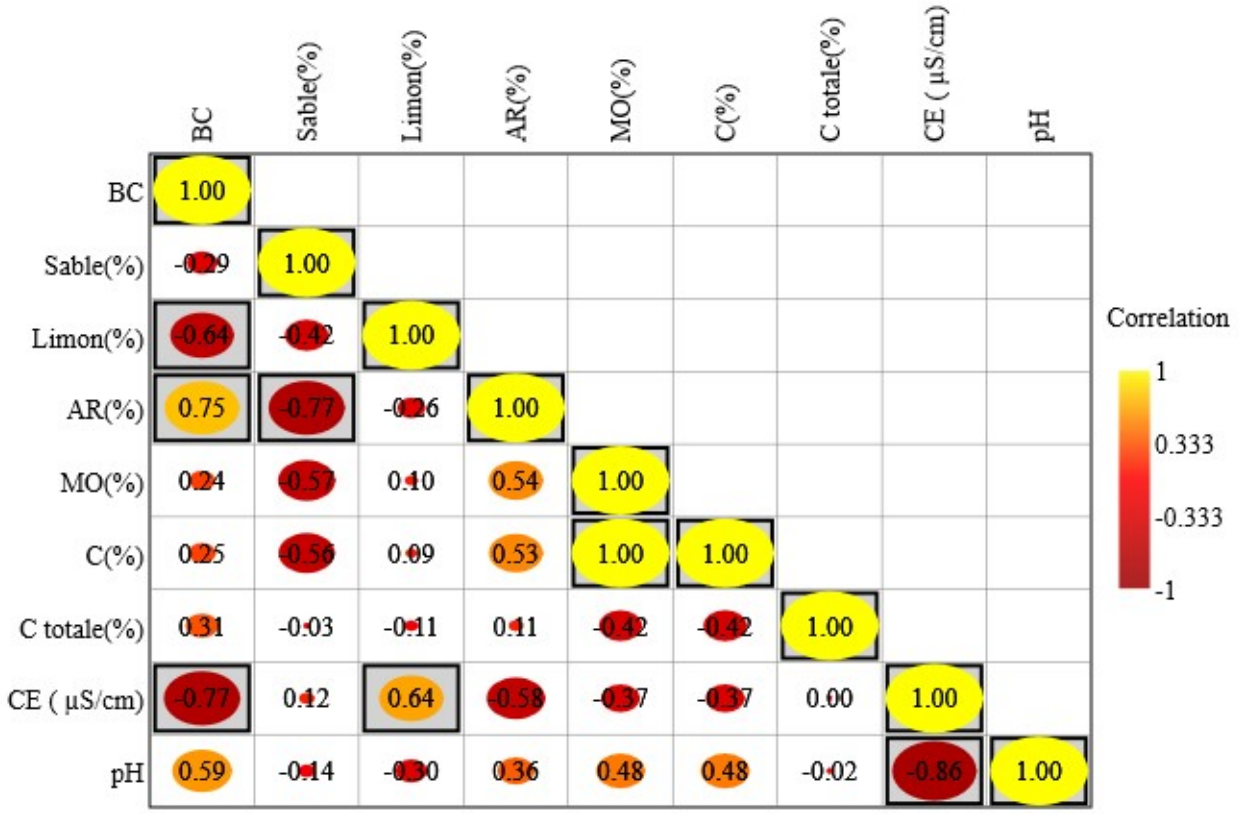


Figure 8. Carte de chaleur des corrélations (coefficients de Pearson) entre les différents paramètres du solsous climat semi- aride (Corrélations marquées à P<0,05).(pH : Potentiel d'hydrogène, CE : la conductivité electrique (µS/cm), C total : calcaire total(carbonates) (%), C : carbone organique(%), MO : Matière organique(%); BC: Carbone de la biomasse microbienne(%)).

Chapitre 03 :
Discussion générale et conclusion

Il est essentiel de comprendre les relations entre les végétaux et le sol pour étudier le fonctionnement des écosystèmes, en particulier dans les régions semi-arides où les conditions écologiques sont restrictives.

Dans les environnements de steppes et forestiers, où la végétation a un rôle structurant, ces interactions revêtent une importance particulière. L'examen simultané des caractéristiques physico-chimiques du sol et de l'activité biologique dans la rhizosphère offre une meilleure compréhension de l'influence d'éléments tels que l'âge de la plante sur la dynamique microbienne et la qualité du sol (Barea *et al.,* 2005 ; Rilling *et al*., 2006).

Dans ce cadre, *Pistacia atlantica* Desf., une espèce autochtone des steppes algériennes, représente un exemple écologique pertinent. Même si les études sur son écophysiologie sont encore restreintes (Habani, 2016), cette espèce occupe une place centrale dans l'organisation des communautés végétales, la gestion des processus écologiques du sol et la conservation de la biodiversité microbienne. Sa présence persistante et sa robustesse face aux conditions de sécheresse font d'elle un élément essentiel dans les processus de préservation des sols et de résilience des écosystèmes locaux..

Cette analyse portant sur la station de Ghar Abada (Tébessa) s'inscrit dans cette démarche d'exploration. Les résultats obtenus soulignent des effets variables de cet arbre sur les caractéristiques édaphiques et la biomasse microbienne en fonction de l'âge des individus.

Le pistachier, objet de cette étude se trouve sur des sols dégradés avec une densité apparente elevée(1,40–1,55 g/cm³)(Aloui *et al.,* 2024)et une texture limono-argileuse.Cette particularité texturale peut influencer la porosité ainsi que la rétention hydrique, deux facteurs déterminants pour l'activité et le développement de la biomasse microbienne (Six *et al*., 2002).

Parmi les paramètres du sol ayant subi l'effet significatif de l'age de cet arbre, figurent le pH et la CE. En effet, le pHest significativement plus élevé chez les jeunes sujets, ce qui pourrait indiquer selon Hinsinger *et al.*(2005), une plus grande activité racinaire et une meilleure assimilation des ions H^+/OH^-. Cependant malgré cette variation,les valeurs observées restent dans la fourchette alcaline à légèrement alcaline (Brady et Weil, 2016), influencé par la matériel parental de la région steppique qui est calcimagnésien (Halitim, 1988).

La conductivité électrique demeure dans la catégorie des sols non salés (< 600 µS/cm) pour les deux groupes (Mathieu et Pieltain, 2003).N'empèche que ce paramètre soit significativement plus élevé chez les vieux sujets, ce qui pourrait refléter, selon Riet et Haynes (2003), une accumulation de sels ou une moindre absorption par un système racinaire affaibli.

Quant à la teneur en carbonates totaux, les sols des jeunes pistachiers présentent des valeurs comprises entre 5 et 25 %, tandis que ceux des vieux varient de 25 à 50 %. Selon la classification de Baize (2000), Ces résultats traduisent des sols allant de modérément à fortement calcaires. Cette teneur élevée en calcaire pourrait s'expliquer par une accumulation progressive de carbonates au fil du temps, favorisée par les conditions arides locales. En effet, selon Duchaufour (2001), le climat sec limite le lessivage des éléments solubles, ce qui conduit à une concentration accrue de carbonates dans le sol, phénomène typique des régions à faible pluviosité).

Selon la classification de Baize (2000), les sols contenant entre 2 % et 4 % de matière organique (MO) sont considérés comme modérément riches, ce qui place les deux groupes étudiés dans la classe moyenne. Et bien que les taux soient plus abondants chez les jeunes sujets, les différences ne sont pas significatives. Ces résultats suggèrent une tendance vers une activité biologique plus intense dans les sols jeunes, soutenant l'idée que les exsudats racinaires varient selon l'âge et influencent la teneur en matière organique(Baudoin et *al.*, 2003). En effet, plusieurs études ont montré que la forte densité racinaire chez les jeunes sujets, stimule la biomasse microbienne et les processus de séquestration du carbone organique (Fontaine *et al*., 2003 ; Cotrufo *et al*., 2013). À l'inverse, les vieux sujets, avec une productivité racinaire réduite et une minéralisation potentiellement plus active, tendent à présenter des taux plus faibles de MO disponible (Jobbágy et Jackson, 2000).

Vis-à-vis de l'âge du pistachier, une tendance à la diminution de la biomasse microbienne est observée chez les arbres âgés (0,22 ± 0,12) comparativement aux jeunes sujets (0,38 ± 0,10). Bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative ($p = 0,063$), cette tendance peut être attribuée à une activité racinaire plus dynamique dans les jeunes plants, stimulant la croissance microbienne *via* la libération d'exsudats riches en composés carbonés(Marschner *et al.*, 2001).Elle pourrait s'expliquer par une dégradation progressive des conditions édaphiques autour des racines des arbres âgés, notamment la réduction de la matière organique, l'augmentation de la salinité et de l'alcalinité, et une moindre exsudation racinaire (Lambers *et*

al., 2008). Une dynamique similaire a été rapportée chez *Retama sphaerocarpa* par Gallardo *et al*. (2006), où les individus plus âgés présentaient une moindre activité microbienne dans des sols arides du Sud méditerranéen.

En tous les cas, la biomasse microbienne au niveau de la rhizosphère du *Pistacia atlantica*est relativement faible dans le contexte pédoclimatique aride des Hauts Plateaux. Une valeur moyenne de 0,44% est obtenue par Djelailia et Mahmoudi(2024)dans les région de foret Dokan (Tébessa). Il a été rapporté egalement par Bourahla *et al.* (2015), que la biomasse microbienne représente en moyenne 1,5 % du carbone organique total dans les sols steppiques algériens. Brookes (2001) signale des valeurs allant de 1 à 4 % de la matière organique totale dans divers types de sols. Par comparaison, Djoudi *et al.* (2020) ont mesuré des taux allant de 0,7 % à 1,2 % dans la rhizosphère de l'olivier (*Olea europaea*) cultivé en conditions semi-arides, tandis que Bouhadida *et al.* (2014) ont trouvé des valeurs comprises entre 0,6 % et 1,1 % dans la rhizosphère de *Rosmarinus officinalis* dans les régions arides de l'Est algérien. Ces comparaisons confirment que les valeurs obtenues dans notre étude sont relativement faibles, ce qui peut être attribué à la faible teneur en matière organique(Anderson et Domsch, 1989), ou peut également être liée à des conditions de stress hydrique telles que la sécheresse, qui limite l'activité microbienne (Hueso *et al*., 2012).

Concernant la corrélation entre la biomasse microbienne et les paramètres du sol, l'analyse de la matrice de corrélation a révélé que l'argile est positivement corrélée à la biomasse microbienne,ce qui pourrait s'expliquer par la capacité de l'argile à protéger les microorganismes et à retenir l'humidité (Sessitsch *et al*., 2001). De même, la corrélation parfaite entre la matière organique et le carbone organique (r = 1,00) confirme que la matière organique constitue une source principale de carbone pour la microflore du sol, en accord avec les travaux dePaul (2015). Enfin, une corrélation positive significative est notée entre la conductivité électrique (CE) et le limon, suggére une accumulation d'ions solubles dans les fractions limoneuses qui favorisent la rétention d'eau (Khaziev, 2005).

D'un autre coté, la relation inverse entre la CE et la biomasse microbienne indique que l'accumulation de sels inhibe l'activité biologique du sol. Ce résultat est cohérent avec les conclusions de Rietz et Haynes (2003) qui ont montré que la salinité réduit la diversité et la biomasse microbienne. De plus, le pH est inversement corrélé à la CE, ce qui reflète une

interaction chimique classique entre la salinité et l'acidité du sol. Une corrélation négative entre le limon et la biomasse microbienne a également été enregistrée, probablement en lien avec une faible aération et un excès d'humidité dans ces fractions, défavorables à certains groupes microbiens(Brady et Weil,2008). Enfin, la corrélation négative entre l'argile et le sable reflète une opposition texturale typique (Hillel, 2004).

À partir des données recueillies, il semble que l'âge du pistachier exerce une influence réelle sur les propriétés physico-chimiques du sol ainsi que sur l'activité biologique de la rhizosphère. Bien que certaines différences ne soient pas significatives statistiquement, les tendances générales suggèrent que les jeunes sujets favorisent un environnement plus propice à la vie microbienne, avec une teneur plus élevée en matière organique. Laréduction de l'activité microbienne chez les vieux sujets est probablement liée à une accumulation progressive de sels (CE élevée) qui freine le développement des microorganismes.

En conclusion, les résultats de cette étude soutiennent globalement l'idée que les jeunes racines dynamisent la rhizosphère, mais soulèvent aussi la complexité des interactions sol–plante–microbiote, nécessitant davantage d'études à long terme pour mieux comprendre ces dynamiques.

Références bibliographique

- **Agence Nationale de Développement de l'Investissement (ANDI). (2015).** Rapport annuel sur l'investissement en Algérie. https://www.andi.dz/fr/rapports/rapport2015.
- **Aloui, M., Neffar, S., & Chenchouni, H. (2024).** Using ensemble modeling to predict the current distribution of *Pistacia atlantica* Desf. in Algeria. The Science of Nature, 111(6), 1-12.
- **Anderson, T. H., & Domsch, K. H. (1989).** Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. Soil Biology and Biochemistry, 21(4), 471–479. https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90117-X
- **Atlas, R. M. (2004).** Handbook of microbiological media. CRC press.
- **Baize, D. (2000).** Classification des sols selon la teneur en calcaire. QUAE Éditions.
- **Baize, D. (2000).** Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols : Références et interprétation. INRA Éditions.
- **Barea, J. M., Pozo, M. J., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. (2005).** Microbial cooperation in the rhizosphere. Journal of Experimental Botany, 56(417), 1761–1778.
- **Baudoin, E., Benizri, E., &Guckert, A. (2003).** Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere. Soil Biology and Biochemistry, 35(9), 1183-1192. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00179-2
- **Bouhadida, M., Djemai, R., Djekoun, A., &Morsli, A. (2014).** Influence de la rhizosphère de *Rosmarinusofficinalis* sur l'activité microbienne des sols arides algériens. African Journal of Agricultural Research, 9(6), 573–580. https://doi.org/10.5897/AJAR2013.8350
- **Bourahla, L. (2017).**Etude du comportement de la biomasse microbienne des sols steppiques d'Algérie.
- **Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008).** The nature and properties of soils (14th ed.). Pearson Prentice Hall.
- **Brookes, P. (2001).** La biomasse microbienne du sol : concept, mesure et applications dans la recherche sur les écosystèmes du sol. Microbes and Environments , 16 (3), 131-140
- **Chantigny, M., & Angers, D. (2005).**Activités microbiologiques et qualité des sols: quoi de neuf sous nos pieds. In Colloque en environnement:«des outils d'intervention

à notre échelle», Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (Vol. 10).

- **Chaussod, R., Breuil, M. C., Echairi, A., Nouaïm, R., Nowak, V., & Ranjard, L. (1996).** La qualité biologique des sols. Évaluation et implications, Étude et gestion des sols, 3, 261-278.
- **Chen, C., Chen, H. Y., Chen, X., & Huang, Z. (2019).** Meta-analysis shows positive effects of plant diversity on microbial biomass and respiration. Nature communications, 10(1), 1332.
- **Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Denef, K., & Paul, E. (2013).** The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework: Soil organic matter stabilization in the microbial era. Nature Climate Change, 3(4), 320–326. https://doi.org/10.1038/nclimate1796
- **Davet, P. (1996).** Vie microbienne du sol et production végétale. Editions Quae.
- **Defaflia, N. (2007).** Caracterisation geologique, geomecanique et potentiel industriel des roches carbonatees de la regionde tebessa (Doctoral dissertation, تبسة-جامعةالشيخالعربيالتبسي).
- **Dixon, G. R., & Tilston, E. L. (Eds.). (2010).** Soil microbiology and sustainable crop production. Springer Science & Business Media.
- **Djoudi, Y., Toumatia, O., Sabaou, N., &Zitouni, A. (2020).**Évaluation de l'activité microbienne dans la rhizosphère de l'olivier (*Olea europaea*) cultivé en zone semi-aride. Revue des Bioressources, 10(2), 27–34.
- **Duchaufour, P. (2001).** Introduction à la science du sol (6e éd.). Paris, France : Dunod.
- **Fontaine, S., Mariotti, A., &Abbadie, L. (2003).** The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? Soil Biology and Biochemistry, 35(6), 837–843. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8
- **Gallardo, A., Covelo, F., & Fernández-Palacios, J. M. (2006).** Biomass and nutrient content in *Retamasphaerocarpa* shrubs in a Mediterranean semi-arid environment: Influence of age and environmental conditions. Journal of Arid Environments, 64(2), 307–324.

- **Galloway, J. N., et al. (2008).**The nitrogen cascade. BioScience, 58(6), 363-370.
- **Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010).** Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols (Vol. 14). EPFL Press.
- **Godwin, R. J. (1992).** Le genie agricole au service du developpement: production vivriere en zones de faible pluviosite: facons culturales appropriees (Vol. 83). Food & Agriculture Org..
- **Habani, N. (2016).** Contribution à l'étude écodendrométrique et dendroécologique du Pistachier de l'Atlas (Pistacia atlantica Desf.) en Algérie (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences Biologiques).
- **Hillel, D. (2004).** Introduction to environmental soil physics. Elsevier Academic Press.
- **Hinsinger, P., Gobran, G. R., Gregory, P. J., & Wenzel, W. W. (2005).** Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. New Phytologist, 168(2), 293-303. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01512.x
- **Horwath, WR (2017).** Le rôle de la biomasse microbienne du sol dans le cycle des nutriments. Biomasse microbienne : un changement de paradigme dans la biogéochimie terrestre , 41-66 .
- **Hueso, S., García, C., & Hernández, T. (2012).** Severe drought conditions modify the microbial community structure, size and activity in amended and unamended soils. Soil Biology and Biochemistry, 50, 167–173. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.026
- **Insam, H., &Domsch, K. H. (1988).** Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. Microbial Ecology, 15(2), 177–188.
- **Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000).** The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 10(2), 423–436. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2

- **Joergensen, R. G. (1995). The fumigation-extraction method. In K. Alef & P. Nannipieri (Eds.)**, Methods in applied soil microbiology and biochemistry (pp. 376-396)
- **Khaziev, F. H. (2005).** Microbiological and biochemical activity of soils. Moscow: Nauka.
- **Labster. (n.d.).** Microbial growth temperature. Labster Theory. Accessed [date] from https://www.labster.com].
- **Lal, R. (2004).** Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. science, 304(5677), 1623-1627.
- **Lambers, H., Chapin III, F. S., & Pons, T. L. (2008).** Plant physiological ecology (2nd ed.). Springer.
- **Lame, B., Abdelkader, D., & Yahia, B. (2015**). Microbial biomass behaviour in Algerian steppe soils..
- **Lauber, C. L., Hamady, M., Knight, R., & Fierer, N. (2009).** Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. Applied and Environmental Microbiology, 75(15), 5111–5120. https://doi.org/10.1128/AEM.00335-09
- **Macheroum, A., Kadik, L., Neffar, S., & Chenchouni, H. (2021).** Environmental drivers of taxonomic and phylogenetic diversity patterns of plant communities in semi-arid steppe rangelands of North Africa. Ecological Indicators, 132, 108279.
- **Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2008).**Brock Biology of Microorganisms (12th ed.). Pearson Prentice Hall.
- **Marschner, P., Yang, C.-H., Lieberei, R., & Crowley, D. E. (2001).** Soil and plant specific effects on bacterial community composition in the rhizosphere. Soil Biology and Biochemistry, 33(11), 1437-1445. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00052-9
- **Masson, A.-S., & Simonin, M. (2022).** Le microbiote des plantes, de son rôle dans la survie végétale à son ingénierie pour une agriculture durable. Planet-Vie, École normale supérieure. https://planet-vie.ens.fr/thematiques/microbiologie/le-microbiote-des-plantes-de-son-role-dans-la-survie-vegetale-a-son

- **Mathieu, C., & Pieltain, F. (2003).** Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Paris : Tec & Doc Lavoisier.
- **Mukerji, K. G., Manoharachary, C., & Singh, J. (Eds.). (2006).** Microbial activity in the rhizosphere (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- **Ollivier, J., Töwe, S., Bannert, A., Hai, B., Kastl, E. M., Meyer, A., ... & Schloter, M. (2011).** Nitrogen turnover in soil and global change. FEMS Microbiology Ecology, 78(1), 3-16.
- **Paul, E. A. (2007).** Soil microbiology, ecology, and biochemistry (3rd ed). Academic Press.
- **Paul, E. A., & Clark, F. E. (1996).** Soil microbiology and biochemistry(2nd ed.) Academic Press.
- **Paul, EA, Harris, D., Klug, MJ, & Ruess., R.W. (1999**).La détermination de la biomasse microbienne. Méthodes standard des sols pour la recherche écologique à long terme , 291-317 .
- **Rahima, D., & Takwa, M. (2024).** Etude de la biomasse microbienne du sol de deux forets algérienne (Thése de Doctorat, Université de Echahid Cheikh Larbi Tébessi– Tébessa-).
- **REDJEB, M., & TICHATI, S. (2019).** *Estimation du stock de carbone séquestré dans les sols des parcours steppiques d'une zone semi-aride à différents faciès* (Doctoral dissertation, Universite laarbi tebessi tebessa).
- **Rietz, D. N., & Haynes, R. J. (2003).** Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry, 35(6), 845-854. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00125-1.
- **Rillig, M. C., Wright, S. F., Nichols, K. A., Schmidt, W. F., & Torn, M. S. (2001).** Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. Plant and Soil, 233, 167–177.
- **Rouabhia, A., Baali, F., Fehdi, C., Abderrahmane, B., & Djamel, B. (2010).** Hydrogeochemistry of groundwaters in a semi-arid region: El Ma El Abiod aquifer, Eastern Algeria. Arabian Journal of Geosciences, 4(5–6), 973–982.

- **Sessitsch, A., Weilharter, A., Gerzabek, M. H., Kirchmann, H., &Kandeler, E. (2001).** Microbial Population Structures in Soil Particle Size Fractions of a Long-Term Fertilizer Field Experiment. Applied and Environmental Microbiology, 67(9), 4215-4224. https://doi.org/10.1128/AEM.67.9.4215-4224.2001.
- **Sharma, S. K., Singh, U. B., Sahu, P. K., Singh, H. V., & Sharma, P. K. (2021).** Rhizosphere microbes. Singapore: Springer.
- **Singh, Y. V. (2024).** Standard methods for soil, water and plant analysis. CRC Press.
- **Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., De Moraes, J. C., & Albrecht, A. (2002).** **Soil** organic matter, biota and aggregation in temperateand tropical soils—Effects of no-tillage. Agronomie, 22(7-8), 755-775. https://doi.org/10.1051/agro:2002043
- **Stolp, H. (1988).** Microbial ecology: organisms, habitats, activities. Cambridge University Press.
- **Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005).** Principles and applications of soil microbiology (pp. 373-404). Pearson.
- **Tate III, R. L. (2020).** Soil microbiology. John Wiley & Sons.
- **Tisdall, J. M., &Oades, J. M. (1982).** Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of soil science, 33(2), 141-163.
- **Van Elsas, J. D., Trevors, J. T., & Wellington, E. M. H. (2007).** Modern Soil Microbiology (2nd ed.). CRC Press.
- **Wala, M., Sierka, E., & Węgrzyn, M. (2022).** The importance of abiotic and biotic factors for soil microbial biomass and respiration in novel ecosystems on hard coal spoil heaps. Plants, 11(22), 3033.
- **Whipps, J. M. (1990).** Carbon economy. In J. M. Lynch (Ed.), The Rhizosphere (pp. 59–97). John Wiley & Sons.

Annexes

Annexe 1 . Analyses physico-chimiques du sol

Les échantillons prélevés ont été séchés à l'air libre, puis tamisés à 2 mm afin d'obtenir la fraction fine du sol utilisée pour les analyses suivantes,

1- pH : Potentiel d'hydrogène

Mode opératoire :

- Peser 10g de terre fine.
- Ajouter 50ml eau distillée (Extrait sol –eau : 1/5)
- Agiter 2mn.
- Laisser reposer la solution du sol 30 mn.
- Lire au pHmètre.

Classification des sols selon le pH

pH	Type de sol
<5	Fortement acide
5-6	Franchement acide
6-6.6	Légèrement acide
6,6-7,4	Neutre
7,4-7,8	Legèrement alcalin
>7,8	Alcalin

2- La salinité globale : la conductivité electrique (µS/cm)

Mode opératoire :

Identique à celui du pH

Appareil : conductimètre

Classification des sols selon la CE

CE (µS/cm)	Type de sol selon la salinité
< 600	Non salé
600-1000	Légèrement salé
1000-2000	Salé

2000-3000	Très salé
3000-4000	Extrèmement salé

3- Dosage du calcaire total (carbonates)

Mode opératoire :

- Prendre 10ml d'HCl dilué dans un bécher de 50 ml (Verser toujours l'acide sur l'eau)
- Peser le Becher avec l'acide =p1
- Prendre 10 g de terre fine, verser la terre petit à petit dans le bécher contenant l'HCl :P1 jusqu'à l'arret de l'effervescence
- Agiter le bécher et laisser reposer quelques mn puis réagiter une ½ H.
- Peser le bécher avec son contenu, agiter, laisser reposer quelques m , puis repeser. Noter le poids après la stabilisation =P2

Calcul :

Poids du CO_2 dégagé =Poids du bécher +acide + sol (avant la réaction) –Poids du bécher + acide + sol (après réaction).

$$\% CaCO_3 = \text{Poids du } CO_2 \text{ dégagé} \times 2{,}274 \times 100 / \text{Poids du sol}$$

$$= \text{Poids du } CO_2 \times 227{,}4 / \text{Poids du sol}$$

Classification des sols selon le taux du calcaire total

Calcaire (%)	Type de sol
<1	Non calcaire
1- 5	Peu calcaire
5- 25	Modérément calcaire
25-50	Fortement calcaire
50-80	Très fortement calcaire
➢ 80	Excessivement calcaire

4-Le carbone organique (la méthode de Walkley et Black, 1934)

Principe :

On oxyde le carbone organique d'un échantillon avec le bichromate de potassium (K2Cr2O7) en excès (en milieu acide). L'excès de bichromate non réduit par le carbone organique est alors titré par une solution de sels de Mohr (le sulfate ferreux) .Ce titrage se fait en présence d'unindicateur coloré (le diphénylamine) qui vire au vert foncé lorsque l'excés de bichromate est réduit.

Produits :

- -Bichromate de K : 8%
- -Acide sulfurique : 15ml
- -NaF : 1g
- -Diphenyl amine/ 0,1g+ 20ml acide sulf+4ml eau (flacon brun)
- -Sel de Mohr (0,2N)

Solutions à préparer :

- Bichromate de potassium (8%) : dissoudre 80g de bichromate dans une fiole de 1000ml d'eau distillée
- Diphenylamine : dissoudre 0,5 g de diphénylamine dans 100ml acide sulfurique et verser cette liqueur sur 20ml eau distillée et conserver dans un flacon brun (/5)
- le sel de Mohr (sulfate de fer et d'ammonium) à 0,2 N : Peser 7,85 g de sels de Mohr dans 50ml d'eau distillée bouillie et refroidie contenant 2ml acide sulfurique = 2ml acide sulfurique + 48ml eau distillée bouillie et compléter à 100ml et conserver dans un flacon brun)

Mode opératoire :

- introduire 1 g de sol tamisé dans une erlen, y ajouter 10 ml de bichromate de potassium(8%), ajouter 15ml acide sulfurique.
- agiter 2 minute et laisser reposer 30mn
- transvaser dans une fiole et ajouter à 250 ml les eaux de rinçage de l'erlen.
- prélever 50ml dans un bécher
- ajouter 1 g de NaF et 3 à 4 gouttes de diphénylamine
- titrer le sol avec le sel de Mohr (sulfate de fer et d'ammonium) à 0,2 N.
- la solution de couleur brun-noireatre virera au vert (X ml de sel de Mohr).

- Témoin (Y) : suivre les mêmes étapes sans le sol

4- Calcul;

$$C(\%) = \frac{(Y-X)* 0{,}6mg\ C *100}{200mg \text{ de sol selon le cas}} = \frac{(y-x)* 0.3}{}$$

Remarque :

Comme l'oxydation du carbone est à froid et donc incomplète, elle est en moyenne de 76%

(100/76= 1,31),On multiplie le résultat par 1,31.

Considérant que la matière organique (M. O.) = C × 1,724.

Classification des sols selon le taux de matière organique (Schaefer, 1975)

Taux e matière organique(%)	Terre
<1	Très pauvre
1-2	Pauvre
2-4	Moyenne
>4	Riche

5- Texture du sol par la méthode de la saturation ou de la bouteille

Cette méthode simple permet d'estimer la texture du sol (proportions de sable, limon et argile) par décantation dans l'eau.

Étapes :

1. Remplir une bouteille transparente au 1/3 avec un échantillon de sol sec et tamisé.

2. Ajouter de l'eau jusqu'aux 2/3 de la bouteille.

4. Fermer et agiter vigoureusement pendant 2 à 3 minutes.

5. Laisser reposer sans bouger pendant 24 à 48 heures.

6. Observer les différentes couches formées :

Le sable se dépose en premier (couche inférieure)

Le limon forme la couche intermédiaire

L'argile reste en suspension plus longtemps et forme la couche supérieure

7. Mesurer l'épaisseur de chaque couche pour calculer les pourcentages et déterminer la texture selon le triangle textural.

Annexe 2 . Analyses biologique du sol

2.1. Estimation de la biomasse microbienne technique de fumigation-extraction (Chaussod, 1996)

Mode opératoire :

1-Placer les échantillons prélevés dans des sachets de stockage

2- Sécher les échantillons dans l'étuve à 105°C pour une durée de 24H

3- Tamiser par un tamis de 2 mm de diamètre.

4- Peser un echantillon de 4 g et le placer dans une boîte de Pétri

5- Soumettre l'éhcantillon à des vapeurs de chloroforme dans un dessicateur pendant 24 Heures à 20°C(= fumigation).

6- L' échantillon- témoinne doit pas être exposé au chloroforme.

7-Mélanger l'échantillon de sol avec 20 ml de sulfate de potassium à une molarité de 0,05 N (Rapport sol/ solution 1/5) (1N= 87,1g/L , donc 4, 33g/L pour 0,05N).

8-Ce mélange est agité pendant un peu plus d'une demi-heure (45 minutes) puis centrifugé dans des tubes à essai pendant un quart d'heure (15minutes) à une vitesse atteignant environ 4500 tours/minute, pour récuperer le surnageant contenant le carbone extractible.

9- Le surnageant obtenu est séché à 50°C / 24h

10-Dosage du carbone dans le résidu par la méthode de Walkley et Black (1934) (Voir détails de la méthode dans le dosage du carbone) =

(residu + 15ml H_2SO_4 + 10ml Bichromate, agiter 2 mn et laisser reposer 30mn. Transvaser dans un bécher jusqu'à100 ou 250 ml (ou 500 ml). Prélever et doser dans 10ml .

-Le taux de carbone est calculé selon la formule de W.B

-La mesure de la teneur en carbone de la biomasse microbienne est déduite à partir du carbone calculé dans le sol par la méthode citée en haut. Chaque essai est reproduit en trois répétitions. L'équation fournie utilise la quantité de carbone soluble trouvée dans l'extrait de sol fumigé et non fumigé

$$Bc = (CF-CNF) /Kec$$

BC : carbone dérivé de la biomasse microbienne (%)

CF : carbone du sol fumigé (CF)

CNF : carbone du sol non fumigé

Kec : le coefficient d'efficacité d'extraction du carbone de la biomasse microbienne =0,38

1. En quoi consiste la biomasse microbienne ?

Le concept de biomasse microbienne (BM) fait référence à la fraction vivante de la matière organique, considérant l'ensemble des microorganismes du sol comme un tout (Chaussod *et al.,* 1996). Par simple définition, il s'agit de la quantité totale de matière organique constituée par les micro-organismes présents dans un environnement donné, dont la taille est inférieure à 5-10 µm (Joergensen,1995). On estime notamment que la diversité bactérienne des sols varie entre 104 et 109 espèces et qu'un gramme de sol compte plus de 109 micro-organismes (Van Elsas *et al.,* 2007). Ces micro-organismes constitués principalement de bactéries, d'archées et de champignons, jouent un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques et la structuration des sols. En d'autres termes, c'est la masse de "carbone vivant" contenue dans les microbes du sol (Atlas,2004), composée en majorité de micro-organismes chimio-organotrophes (Tate*,* 2020).

La biomasse microbienne du sol constitue environ 1 à 4% de la matière organique du sol (Brookes, 2001). Cet indicateur biologique est généralement exprimé en milligrammes de carbone par kilogramme de sol ou en microgrammes de carbone par gramme de poids sec. Son intérêt réside dans sa fonction de réservoir de nutriments, son rôle dans la structuration et la stabilisation du sol, ainsi que marqueur écologique (Sylvia *et al*., 2005 ; Horwath., 2017). Selon Insam et Domsch (1988), la majorité de la communauté microbienne peut être dormante à tout moment dans la plupart des sols, prête à répondre à mesure que les conditions deviennent favorables.

2.Importance des microorganismes dans les sols

2.1. Structure et agrégation du sol

Ils contribuent à la formation des agrégats du sol en secrétant des substances collantes qui agglomèrent les particules minérales et organiques, cas de la resine (Atlas, 2004). Les filaments fongiques peuvent lier mécaniquement les particules du sol entre elles (Godwin, 1992). favorisant ainsi l'infiltration de l'eau, l'aération du sol et la rétention des nutriments (Tisdall *et al.,* 1982).

2.2.Cycles biogéochimiques

- La biomasse microbienne joue un rôle majeur dans les processus biochimiques qui se déroulent dans cet environnement. Elle a une influence décisive sur les processus métaboliques du sol et se comporte comme un réservoir d'éléments minéraux : elle les maintient dans les horizons supérieurs du sol, les protège du lessivage et les restitue progressivement aux plantes (Gobat *et al*., 2010), surtout l'azote (Ollivier *et al*., 2011).
- Elle est considérée comme le principal facteur affectant la fertilité du sol (Singh, 2024) car lors de la mort et de la lyse des cellules microbiennes, leur contenu cytoplasmique enrichit le sol en nutriments (Lian *et al*., 2013 *in* Lame *et al.,* 2015).
- La population microbienne remplit une fonction essentielle et obligatoire dans le « recyclage » des matières organiques retournées au sol (Godwin,1992 ; Chantigny et Angers, 2005).

2.3. Interactions avec les plantes

Les micro-organismes de la rhizosphère des plantes dominent le cycle des nutriments dans les systèmes sol-plante (Fig. 1). Ils augmentent la capacité des plantes à acquérir des nutriments du sol soit en augmentant l'étendue du système racinaire (par exemple par l'intermédiaire d'hyphes fongiques) soit en solubilisant des macronutriments tels que le phosphore ou le soufre (Smith et Read, 1997 *in* Mukerji *et al.,* 2006).

-Les micro-organismes bénéfiques associés aux plantes peuvent avoir des effets positifs sur la germination des graines, la vigueur des plantules, la nutrition, la croissance et le développement des plantes et la productivité (Masson et Simonin *et al*., 2022). Selon Davet (1996), ils protègent les plantes contre les maladies en produisant des substances antimicrobiennes ou en entrant en compétition avec les agents pathogènes.

-Les interactions entre les microbes végétaux jouent un rôle clé dans les processus écosystémiques cruciaux, à savoir : séquestration du carbone, agrégation du sol et cycle des nutriments dans l'écosystème de la rhizosphère (Singh et al., 2004 *in* Sharma *et al.,* 2021).

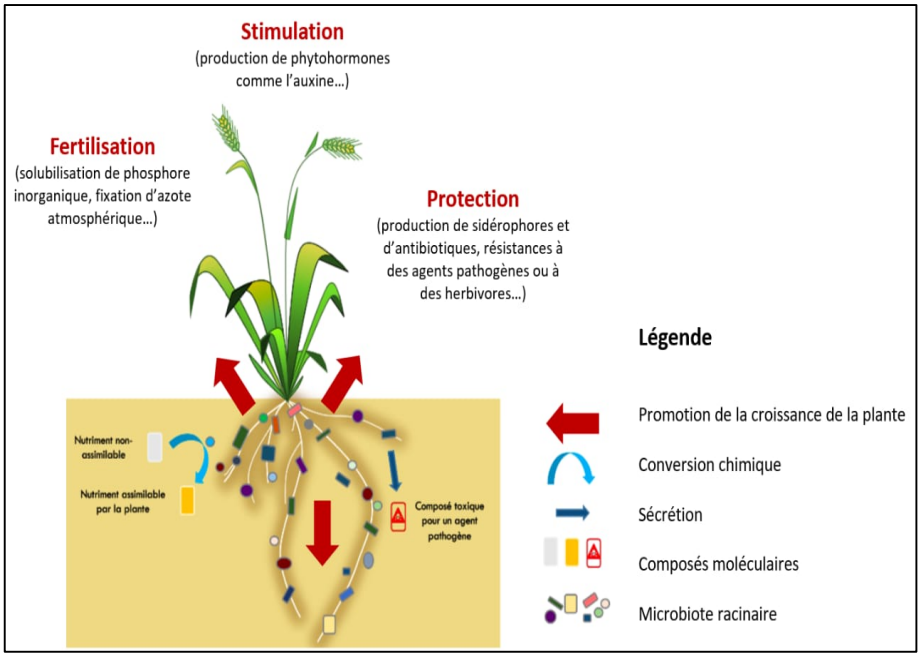


Figure 1. Les fonctions du microbiote racinaire dans la survie des plantes (Masson et Simonin *et al*., 2022).

-Par leur activité intense dans la rhizosphère, les micro-organismes affectent le pH, l'O_2, la tension, le CO_2, la concentration et influencent peut-être aussi la croissance des plantes. Des produits microbiens tels que les phytotoxines, libérés dans la rhizosphère, peuvent affecter directement la croissance des plantes (Malviya *et al.,* 2020 *in* Sharma *et al.,* 2021).

3. Facteurs influençant la biomasse microbienne dans le sol

3.1. Facteurs abiotiques

3.1.1. Facteurs edaphiques

La structure et l'activité de la communauté microbienne du sol dépendent dans une large mesure de l'état de leur habitat. Cet habitat est peut-être mieux envisagé comme une matrice complexe avec des pores et des agrégats de sol de différentes tailles (Sylvia *et al.,* 2005 *in* Dixon et Tilston, 2010). Nous en citons :

-La texture : La taille des particules du sol (sable, limon, argile) influence la porosité, la capacité de rétention en eau et la disponibilité des nutriments, impactant ainsi la croissance microbienne.

-La structure: La structure du sol, définie par l'arrangement des particules en agrégats, affecte l'aération, l'infiltration de l'eau et les habitats disponibles pour les micro-organismes.

- La teneur en matière organique: La matière organique constitue une source de carbone et d'énergie pour les micro-organismes, et sa décomposition influence la disponibilité en nutriments .

-Le pH: Le pH du sol affecte la solubilité des minéraux, la disponibilité des nutriments et la diversité des espèces microbiennes *(*Paul et Clark, 1996). Il a une influence sur la composition microbienne du sol et sur certains aspects de l'activité des microorganismes. Il joue aussi un rôle dans les phénomènes d'adhésion aux particules d'argile *(*Davet, 1996). À titre d'exemple, les champignons sont généralement prépondérants dans les sols acides tandis que les bactéries prédominent dans les sols neutres ou légèrement alcalins. Les études de croissance réalisées au laboratoire montrent que la majorité des champignons est en fait capable de prospérer dans une large gamme de pH , comprise en moyenne entre 3,5 et 8,5 . Leur relative abondance dans les sols acides n'est due qu'à la difficulté pour la plupart des bactéries de se développer à des pH inférieurs à 6,5. Les Actinomycètes , qui ont un rôle antagoniste important vis à vis des champignons , sont particulièrement sensibles à l'acidité (Davet, 1996). Le pH est aussi un filtre environnemental important, ainsi, les sols acides ont une faible biomasse microbienne (Lauber *et al.,* 2009).

-La teneur en eau: L'eau est essentielle à la vie microbienne, mais un excès peut entraîner des conditions anaérobies défavorables à certains groupes microbiens (Paul et Clark, 1996). Elle a aussi de multiples effets mécaniques ou physiques : abondante , l'eau augmente la disponibilité des éléments solubles et facilite les déplacements des micro-organismes mobiles à la recherche de substrats ou de proies. Rare, elle permet de meilleurs échanges gazeux avec l'atmosphère extérieure et un renouvellement plus rapide de l'oxygène. Par conséquent, les variations de la teneur en eau ont des répercussions considérables sur l'activité biologique du sol.

- Le dioxyde de carbone : La proportion de dioxyde de carbone dans l'atmosphère du sol est généralement de l'ordre de 0,3 à 5 %, mais elle peut atteindre ou dépasser 20 % lorsque

l'activité biologique est intense, notamment au voisinage des racines ou d'une source importante de matière organique (Davet, 1996). Dans l'atmosphère extérieure, la teneur en dioxyde de carbone est seulement 0,035 %. La réponse des micro-organismes au dioxyde de carbone est très variable. Par exemple, les bactéries fixatrices d'azote fonctionnent moins efficacement lorsque sa concentration augmente. En revanche, les bactéries nitrifiantes préfèrent des teneurs de l'ordre de 0,15 % (Davet, 1996).

-L'ammoniac : Dans les sols, l'ammoniac est un élément clé dans le cycle de l'azote. Il est une source directe d'azote pour les plantes sous forme de nitrates, après un processus de transformation effectué par des bactéries nitrifiantes. De plus, l'ammoniac peut être utilisé comme engrais pour améliorer la fertilité du sol. Cependant, en excès, il peut avoir des effets négatifs en acidifiant le sol, ce qui perturbe la croissance des plantes.(Galloway *et al.,* 2008).

3.1.2. Facteurs climatiques

-La température :

Chaque micro-organisme a une température minimale et maximale tolérable. Il existe trois températures critiques pour les micro-organismes qui sont généralement déterminées par la température à laquelle les enzymes du micro-organisme fonctionnent. Ces trois températures critiques (également appelées températures cardinales) sont les suivantes :

1. La température de croissance minimale : la température la plus basse à laquelle les cellules peuvent encore se diviser.
2. La température de croissance maximale : la température la plus élevée à laquelle les cellules peuvent encore se diviser.
3. La température de croissance optimale : la température à laquelle les cellules se divisent le plus rapidementl (https://www.labster.com).

Lorsque la température est trop basse, les réactions biochimiques ralentissent, ce qui limite la croissance cellulaire. À l'inverse, des températures trop élevées peuvent dénaturer les protéines et perturber les membranes cellulaires, ce qui entrave la division cellulaire et peut provoquer la mort cellulaire (Madigan *et al.,* 2008).

Selon Stolp (1988), les organismes sont divisés en psychrophiles, mésophiles et thermophiles

1. Les organismes psychrophiles préfèrent des températures inférieures à 20 °C.

2. Les mésophiles, comprenant la plupart des bactéries vivant dans les sols et les eaux, se développent mieux à des températures comprises entre 25 et 40 °C.
3. Les thermophiles sont adaptés à des températures plus élevées et préfèrent des températures supérieures à 55 °C.

3.2. Facteurs biotiques

3.2.1. La végétation

- Le type de végétation : Les racines de la plante , via la rhizodéposition , sont la source d'énergie et de nourriture pour les microorganismes présents dans la rhizosphère (Whipps, 1990).

Selon Wela *et al*. (2022), la diversité végétale peut accroître l'efficacité métabolique des micro-organismes et réduire leur quotient métabolique (rapport de la respiration à la biomasse), en fournissant des ressources variées à travers les exsudats racinaires et la litière végétale. Des analyses globales ont indiqué que la biomasse microbienne, le rapport champignons / bactéries, et la respiration microbienne augmentaient dans les sols cultivés avec des mélanges de plantes par rapport aux monocultures. Ce schéma a été observé dans différents types d'écosystèmes tels que les forêts, les prairies et les champs agricoles.

La biomasse microbienne du sol peut augmenter avec la diversité végétale grâce à une plus grande quantité de carbone et de ressources nutritives disponibles pour les micro-organismes, résultant d'une augmentation de la chute de la litière aérienne et de la mortalité des racines fines dans les communautés végétales riches en espèces .De plus, le mélange d'espèces végétales ayant des fonctions différentes conduit à des exsudats racinaires diversifiés, ce qui favorise à son tour la diversité microbienne et l'augmentation de la biomasse (Chen *et al* .,2019).

-La rhizosphère

La rhizosphère est considérée comme un « point chaud » pour la colonisation et l'activité microbiennes (Lal, 2004), car d'un coté, contrairement au sol, où les sources de carbone organique disponibles ne sont qu'à de faibles concentrations, les rhizosphères sont alimentées par des concentrations plus élevées de sources de nutriments générées pendant la photosynthèse des plantes (Mukerji *et al* .,2006) , et d'un autre coté, comparé au sol sans

racines, le nombre de micro-organismes à proximité ou sur les racines est considérablement plus élevé, généralement de deux ordres de grandeur ou plus. Le rapport R/S est défini comme le rapport entre le nombre d'organismes dans la rhizosphère et le nombre dans le sol adjacent. Il varie selon le type de sol et de plante (Stolp, 1988). Certaines bactéries et certains champignons ont tendance à se rassembler dans le sol immédiatement adjacent aux racines des plantes (la rhizosphère), où ils peuvent se nourrir des sucres que les racines des plantes exsudent ou s'associer physiquement au système racinaire de la plante et échanger des sucres et des nutriments dans une relation (généralement) mutualiste (mycorhizes) (Dixon et Tilston,2010).

3.2.3. Facteurs anthropiques

Selon Lal (2004) , les facteurs anthropiques incluent les pratiques agricoles, tels que, le labour, la fertilisation, l'irrigation et l'utilisation de pesticides qui modifient les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, impactant ainsi la biomasse microbienne ; ainsi que les polluants qui peuvent inhiber l'activité microbienne ou modifier la composition des communautés microbiennes.

La biomasse microbienne du sol constitue l'un des indicateurs biologiques les plus sensibles et les plus précoces de la qualité du sol. En milieu aride, où les contraintes climatiques et édaphiques limitent fortement la productivité des sols, cette fraction vivante de la matière organique joue un rôle fondamental dans le maintien de la fertilité et la résilience des écosystèmes.

Le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*), espèce patrimoniale des régions steppiques du bassin méditerranéen, est confronté à des conditions pédoclimatiques rigoureuses. Sa survie et son développement pourraient être étroitement liés à l'activité microbienne de sa rhizosphère.

Cependant, en dépit de l'importance écologique de cette interaction, peu d'études ont été consacrées à l'évaluation de la biomasse microbienne associée au pistachier de l'Atlas dans les environnements naturels d'Algérie.

Dans ce contexte, une question fondamentale se pose : comment la biomasse microbienne varie-t-elle dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas en fonction de l'âge des arbres et des conditions édaphiques locales ?

Dans le but de répondre à cette question, cette recherche a pour objectif de quantifier la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas, en utilisant la méthode de fumigation-extraction. Elle vise spécifiquement à :

- Estimer la biomasse microbienne dans la rhizosphère du pistachier de l'Atlas en fonction de l'âge des arbres ;
- Analyser l'influence des principales propriétés physico-chimiques du sol sur la biomasse microbienne.

Ce mémoire est articulé en introduction générale et trois parties principales :

- Chapitre 1 : dans lequel la partie « Matériel et méthodes » est décrite incluant la présentation de la zone d'étude, l'echantillonnage et les analyses du sol.
- Chapitre 2 : présentation des résultats
- Chapitre 3 : discussion générale et conclusion, suivi des références bibliographiques et de l'annexe.