

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar –
Annaba
Faculté des Sciences



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية العلوم

Département de Biologie

قسم البيولوجيا

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat Troisième Cycle

Filière : Ecologie et environnement

Spécialité : Ecologie des sols

Par :

DAHMANI Chaima

Thème :

Impact du changement climatique sur les propriétés des sols en zone Méditerranéenne « Cas du Nord Est Algérien ».

Devant le jury :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	BELABED Adnène	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	BENSLAMA Mohamed	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Directeur
03	BOUTABIA Lamia	Prof.	Université Chadli Bendjedid - El Tarf	Examinatrice
04	KETIF Amel	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examinatrice
05	ZAOUI Lilia	MCA	Université 20 Août 1955 de Skikda	Examinatrice

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A la lumière de ce modeste travail, Je voudrais remercier dans un premier temps ALLAH pour m'avoir donnée la volonté, la patience, la force, pour accomplir ce travail scientifique.

Mes remerciements s'adressent à tous les membres de jury, qui nous ont honoré par leur participation à l'examen de ce travail :

Mr. BELABED Adnène, Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, qui me fait l'honneur et l'immense plaisir de présider le jury de ma soutenance. Votre confiance préliminaire et votre volonté de guider les délibérations sont des honneurs que j'apprécie énormément.

Mon directeur de Thèse, **Mr. BENSLAMA Mohamed**, Professeur à l'université de Badji Mokhtar Annaba et directeur de laboratoire de recherche « sol et développement durable » d'avoir assuré l'encadrement de mes travaux, de m'avoir accueillie au sein de son équipe. Je lui suis aussi très reconnaissante pour le temps qu'il m'a accordé, ainsi que pour ses compétences pédagogiques et scientifiques. J'ai beaucoup bénéficié de son expérience et je lui exprime ma reconnaissance pour tout ce qu'il m'a appris.

Mme. BOUTABIA Lamia, Professeur à l'université d'El Tarf, qui m'a honoré d'avoir accepté d'examiner mon travail. J'apprécie énormément le temps qu'elle a consacré ainsi que sa présence bienveillante.

Mme. KETIF Amel, Maire de conférence classe A à l'université de Annaba, pour avoir accepté de faire partie du jury de ma thèse. Je lui suis très reconnaissante pour sa disponibilité, son intérêt et le temps qu'elle a bien voulu consacrer.

Mme. ZAOUI Lilia, Maire de conférence classe A à l'université de Skikda, d'avoir bien voulu accepter d'être une examinatrice de cette thèse, qui me fait l'honneur. J'apprécie profondément le temps quelle accordé à l'évaluation de mon travail malgré leur nombreuse responsabilité.

Je tiens à remercier **Dr. Abderraouf Benslama**, Maire de conférence classe A à l'université de Ghardaïa, J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils. Je vous remercie très sincèrement.

Je tiens à remercier infiniment **le Pr. Ender Makineci** ainsi que toute l'équipe de l'université de Cerrahpsha Istanbul, vous avez toujours été présents pour les bons conseils. Votre humanité et votre aide ont été une source d'inspiration, j'ai eu la chance et l'honneur d'être parmi vos durant mon stage d'étude. Je vous exprime mes profonds respects et gratitudes, ces quelques mots ne suffisant pas pour exprimer toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier également **le Pr. Jose navarro-pedreño** de l'université Miguel Hernández of Elche Spain, pour son aide précieuse et pour le soutien inestimable. Votre esprit de camaraderie et votre solidarité ont rendu les jours difficiles plus légers et les succès plus doux, notre collaboration fut une expérience humaine et scientifique extrêmement enrichissante.

Je tiens à remercier chaleureusement **Mme. Belghit Meriem**, La technicienne du laboratoire «sol et développement durable » pour son assistance précieuse pour sa gentillesse et son soutien contenu qu'ont illuminé chaque journée passée au laboratoire.

Nos remerciements vont également aux membres de l'équipe de laboratoire « sol et développement durables » à l'université Badji Mokhtar Annaba, avec qui nous avons eu des discussions fructueuses à l'occasion de la préparation de ce travail.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Dédicace

À ma famille

Mama et papa, aucun mot ne peut vraiment exprimer ce que je veux dire, et aucun remerciement ne peut exprimer suffisamment la profondeur de ma gratitude pour tout ce que vous avez fait pendant mes moments les plus heureux et les plus difficiles.

À ma mère, la lumière qui guide ma vie, qui m'a inculqué l'amour de la lecture et a fait en sorte que la science devienne une partie de moi. Tu avais toujours des livres entre les mains, m'enseignant le monde à travers mes études, ... et bien plus encore. A mon père qui partageait chaque étape de mon parcours, pour les longs jours d'attente afin d'explorer et de tenir la science. Tu as été ma source d'inspiration, mon Héros, tu portais toujours mes rêves dans tes yeux.

Merci mes parents, vous avez illuminé mon chemin en croyant en moi, en aidant et en me soutenant pour réaliser mes rêves. Celle que je suis aujourd'hui, c'est grâce à vous.

À mes sœurs :

Ma petite chère Malek. Les mots ne peuvent exprimer à quel point je suis reconnaissante pour ta présence dans ma vie. Ton sourire et ton énergie positive ont toujours illuminé mes journées et m'ont donné la force d'avancer. Je te souhaite du fond du cœur une vie pleine de bonheur et de réussite dans tes études.

Ma chère Fatma, As-tu déjà pensée à quel point le monde serait meilleur si tout le monde avait une sœur comme toi. Merci de toujours me soutenir, j'en aurais long et beaucoup à dire, mais le plus important est de te remercier du fond du cœur, surtout d'avoir toujours cru en moi.

À la mémoire de ma grand-mère « *Gacem Fatma Zahra* »

J'espère que ce travail servira comme une aumône continue pour ton âme, pour ton amour pur envers moi et pour les douas qui résonnent encore dans mes oreilles. J'espère t'avoir rendue fière, comme je l'avais promis

Un merci tous particulier à mon oncle et cher ami de mon père, *Hicham Khadraoui* surtout pour son immense gentillesse et pour son aide précieux.

Résumé

Résumé

L'évaluation de la qualité des sols est cruciale pour le développement durable et le maintien des écosystèmes dans un contexte de dégradation croissante des terres et de changement climatique.

Cette situation est plus critique dans les régions vulnérables, notamment en Algérie.

Cette étude vise à (1) analyser l'influence des modes d'occupation des sols (agricole, pastorale, verger, agroforestier et urbain) sur les propriétés physico-chimiques du sol à deux profondeurs (0-5cm et 0-30 cm), (2) caractériser les sols et quantifier les teneurs ainsi que les stocks organiques, (3) estimer les corrélations entre les différentes propriétés des sols, (4) d'évaluer la distinction entre les échelles de temps, travers l'effet combiné du climat et des pratiques de gestion par les différentes profondeurs.

Les échantillons de sol ont été collectés entre 2021 et 2023 dans les wilayas d'El Tarf et d'Annaba. Les analyses ont porté sur la granulométrie, le pH_{eau} , pH_{KCl} , la conductivité électrique, l'humidité hygroscopique, la teneur en matière organique, la teneur en carbone organique, la porosité, la densité apparente du sol et les stocks de carbone organique et de matière organique, le calcaire, ainsi que le rapport C/N.

Les résultats montrent une différence significative selon le mode d'occupation des sols et la profondeur. Ces variations peuvent être attribuées à la variabilité des pratiques de gestion, histoire de la gestion des terres et caractéristiques des sites d'étude ainsi que le type du sol, met et en évidence. Les systèmes agroforestiers et les zones pastorales conservées constituent des stratégies de gestion efficaces. Ils se caractérisent par un stock organique plus élevé et une porosité importante, tandis que les sols urbains se caractérisent par une compaction marquée et de faibles stocks.

Ces résultats soulignent l'importance de pratiques de gestion durable des terres afin d'améliorer la qualité du sol et renforcer la séquestration du carbone en région méditerranéenne.

Mots clés : qualité des sols, propriétés physico-chimiques des sols, stocks de carbone organique, modes d'occupation des sols, changement climatique, Nord-Est de l'Algérie.

Résumé
Abstract

Soil quality assessment is crucial for sustainable development and ecosystem preservation in the context of increasing land degradation and climate change. This situation is particularly critical in vulnerable regions, especially in Algeria.

This study aims to (1) analyze the influence of land use types (agricultural, pastoral, orchard, agroforestry, and urban) on soil physicochemical properties at two depths (0–5 cm and 0–30 cm), (2) characterize soils and quantify organic contents and stocks, (3) assess the correlations between different soil properties, and (4) evaluate the interaction between temporal scales through the combined effects of climate and management practices across different soil depths. Soil samples were collected between 2021 and 2023 in the wilayas of El Tarf and Annaba. Analyses included particle size distribution, pH_{water}, pH_{KCl}, electrical conductivity, hygroscopic moisture, organic matter content, organic carbon content, porosity, bulk density, soil organic carbon and organic matter stocks, calcium carbonate, and the C/N ratio.

The results show significant differences according to land use type and soil depth. These variations can be attributed to variability in management practices, land use history, and site characteristics, as well as soil type. Agroforestry systems and conserved pastoral areas represent effective management strategies they are characterized by higher organic stocks and greater porosity, while urban soils show marked compaction and low carbon stocks.

These findings highlight the importance of sustainable land management practices to improve soil quality and enhance carbon sequestration in Mediterranean regions.

Keywords: soil quality, soil physico-chemical properties, soil organic carbon stocks, land use patterns, climate change, Northeastern Algeria.

تُعدّ تقييم جودة التربة أمرًا بالغ الأهمية لتحقيق التنمية المستدامة والحفاظ على النظم البيئية في ظل تزايد تدهور الأراضي وتغير المناخ. وتعتبر هذه الوضعية أكثر خطورة في المناطق الهشة، كما هو الحال في الجزائر. تهدف هذه الدراسة إلى (1) تحليل تأثير أنماط استعمال الأراضي (الأراضي الزراعية، الرعوية، البساتين، الزراعات الحرجية الحقلية، والمناطق الحضرية) على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة على عمقين (0-5 سم و0-30 سم) ، (2) توصيف التربة وتقدير محتوى ومخزون المواد العضوية ، (3) تقدير العلاقات الارتباطية بين مختلف خصائص التربة ، (4) تقييم التفاعل بين المقاييس الزمنية من خلال الأثر المشترك للمناخ وممارسات التسيير عبر أعماق مختلفة للتربة. تم جمع عينات التربة ما بين 2021 و2023 على مستوى ولايتي الطارف و عنابة. وشملت التحاليل: القوام، درجة الحموضة، الناقلية الكهربائية، الرطوبة الاسترطابية، نسبة المادة العضوية، نسبة الكربون العضوي، المسامية، الكثافة الظاهرية للتربة، مخزون الكربون العضوي و المادة العضوية، نسبة الكلس، إضافة إلى نسبة الكربون/الأزوت أظهرت النتائج وجود فروقات معتبرة حسب نوع استعمال الأراضي وعمق التربة. ويمكن إرجاع هذه التباينات إلى اختلاف ممارسات التسيير، تاريخ إدارة الأراضي، خصائص مواقع الدراسة وكذلك نوع التربة. وتُظهر الأنظمة الزراعية الحرجية والمناطق الرعوية المحافظة أفضل استراتيجيات التسيير ، حيث تميزت بمخزون عضوي أكبر ومسامية عالية. في المقابل، أظهرت التربة الحضرية انضغاط واضحًا ومخزونات ضعيفة. وتبرز هذه النتائج أهمية اعتماد ممارسات تسيير مستدامة للأراضي من أجل تحسين جودة التربة وتعزيز قدرتها على تثبيت الكربون في منطقة البحر الابيض المتوسط.

الكلمات الرئيسية: جودة التربة؛ الخصائص الفيزيائية-الكيميائية للتربة؛ مخزونات الكربون العضوي؛ أنماط استخدام الأراضي؛ التغير المناخي؛ شمال شرق الجزائر.

Sommaire

Remerciements.....
Dédicace.....
Résumé
Abstract.....
ملخص.....
Sommaire
Liste des Figures
Liste des Tableaux.....
Abbriaviation
Introduction générale.....	1
Chapitre. 1.Revue bibliographique.....	5
1.1. Le concept et les perspectives futures de la santé du sol	6
1.2.La notion du sol : sa formation et son évolution	7
1.2.1.Le climat.....	8
1.2.2.La roche mère.....	8
1.2.3.La topographie.....	8
1.2.4.les organismes	8
1.2.5.Le temps	9
1.2.6. Les activités humaines	9
1.3. Propriétés des sols : Perception et analyse scientifique	9
1.4.Contributions des sols face aux changement climatique	10
1.4.1. Définition et concepts généraux	10
1.5.Les fonctions de la matière organique dans les sols.....	11
1.5.1.Fonctions physiques	11
1.5.2. Fonctions chimiques.....	11

Sommaire

1.5.3.Fonctions biologiques.....	11
1.6.Facteurs contrôlent les stocks organiques	12
1.6.1.Mode d'occupation des sols et la profondeur.....	12
1.6.2.Le climat.....	14
1.6.3. Les propriétés des sols.....	14
1.7.Le carbone organique est le principal constituant de la matière organique.....	15
1.8. Le terme séquestration du carbone	15
1.9. La séquestration du carbone dans le contexte du changement climatique.....	16
1.10.Approches de séquestration du carbone.....	17
1.10.1.Séquestration naturelle, biologique ou terrestre du carbone.....	18
1.10.2.Photosynthèse et écosystèmes terrestres	18
1.10.3. Stockage du carbone dans les sols.....	19
1.10.4.Boisement et reboisement.....	19
1.11. Conservation et gestion durable des sols.....	19
Chapitre. 2.Présentation de la région d'étude.....	21
2.Critères de choix de la station d'étude	22
2.1Situation géographique de la région d'étude	23
2.2.1.La zone des plaines	25
2.2.2.La zone de montagne	25
2.2.3. Milieu agricole	25
2.2.4.Géologie	26
2.2.5.Hydrographie.....	26
2.2.6. Pédologie.....	27
2.3.Caractérisations climatiques.....	27
2.3.1.Pluviométrie	28
2.3.2.Température.....	29
2.3.3. L'humidité.....	31
2.4.Les indices climatiques	31
2.4.1.Diagramme ombrothermique de GAUSSEN	31

Sommaire

2.4.2. Le quotient pluviothermique d'Emberger	32
2.4.3. Milieu forestier	33
2.4.4. Caractérisation des stations d'étude	33
Chapitre. 3. Matériels et méthodes	38
3. Méthodes de prélèvement des échantillons	39
3.1. Matériel utilisés sur le terrain	39
3.2. Préparation du sol	41
3.3. Les Analyses physico-chimiques effectuées	41
3.3.1. La Granulométrie	41
3.3.2. Le pH	42
3.3.3. La Conductivité électrique	43
3.3.4. l'humidité hygroscopique	44
3.3.5. Le Calcaire total	45
3.3.6. La teneur en carbone organique	46
3.3.7. La teneur en matière organique	46
3.3.8. La densité apparente	46
3.3.9. Les stocks de carbone organique	47
3.3.10. La porosité	47
3.3.11. La densité réelle	47
3.3.12. La densité apparente	47
3.3.13. Détermination du carbone total et de l'azote total (rapport C/N)	48
3.4. Traitements statistiques	49
Chapitre. 4. Résultats et Discussion	50
4. Résultats des analyses physico-chimiques des sols	51
4.1. Statistiques descriptives	51
4.1.1. Paramètres physico-chimiques de la couche de 0-5 cm	51
4.1.1.1. La texture	52
4.1.1.2. Le pH eau	53
4.1.1.3. Le pH KCL	53

Sommaire

4.1.1.4. La conductivité électrique	54
4.1.1.5. l'humidité hygroscopique.....	55
4.1.1.6. Calcaire total (CaCO ₃).....	56
4.1.1.7. Carbone organique et matière organique des sols	57
4.1.1.8. La densité apparente	58
4.1.1.9. Variation des stocks de carbone organique et de matière organique.....	60
4.1.1.10. Le rapport C/N.....	61
4.2. Paramètres physico-chimiques de la couche de 0-30 cm	62
4.2.1. pH eau.....	63
4.2.2. pH KCL.....	64
4.2.3. La conductivité électrique	65
4.2.4. Calcaire total (CaCO ₃).....	65
4.2.5. l'humidité hygroscopique	67
4.2.6. Carbone organique et matière organique des sols	67
4.2.7. La Porosité.....	69
4.2.8. Le rapport C/N.....	69
4.3. Analyse de variance (ANOVA)	70
4.3.1. ANOVA des paramètres physico - chimique pour les deux couches.....	70
4.3.2. ANOVA à deux facteurs: Terrain et Profondeur.....	75
4.3.3. Analyse de la variance (ANOVA) des fractions granulométriques du sol.....	77
4.4. Corrélations	79
4.4.1. Corrélation de Pearson entre les paramètres physico - chimique du sol	79
4.5. Analyse multivariée.....	81
4.5.1. Analyse en composantes principales (ACP) des propriétés du sol	81
4.5.2. Analyse en composantes principales (ACP) - Indices de terrain.....	83
4.5.3. Analyse en composantes principales (ACP) - Indices de terrain-profondeur.....	85
4.5.4. Clustering Hiérarchique - Dendrogramme	87
4.5.5. Carte factorielle	89

Sommaire

4.6. Discussion générale.....	91
4.7. Conclusion générale et recommandations.....	97
Références	101

Liste des figures

Figure	Titre	Page
1	Le sol : élément central de la biosphère et régulateur des grands équilibres.	7
2	Cycle de la matière organique- séquestration naturelle ou biologique ou terrestre du carbone.	18
3	Carte de la situation géographique de la région d'étude. © (Dahmani C., 2021).	23
4	Région d'étude et zones d'échantillonnage selon les modes d'occupation des sols. © (Dahmani C., 2021).	24
5	Moyenne mensuelle des précipitations relevées dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).	29
6	Moyenne mensuelle des températures relevée dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).	30
7	Diagramme ombrothermique de la région d'étude Pour la période (1988-2018).	32
8	Etage bioclimatique de la région d'étude selon le climagramme d'EMBERGER.	33
9	Modes d'occupation des sols étudiés : A) terre agricole ; B) terre agroforesterie ; C) verger ; D) zone pastoral semi-naturelle ; E) terrain urbain ; F) zone pastorale conservé ; G) terre urbaine ; H) zone pastorale dégradée. © (Dahmani C., 2021).	37
10	Matériel utilisé sur le terrain. © (Dahmani C., 2021).	40
11	Prélèvement des échantillons de sol sur le terrain. © (Dahmani C., 2021).	40
12	Préparation des échantillons de sol. © (Dahmani C., 2021).	40
13	Classe de la texture du sol (USDA par triangle de texture).	42
14	Instrument utiliser : pH mètre et conductimètre (Hanna Instrument, The Netherlands). © (Dahmani C., 2021).	44
15	Matériel utilisé pour la détermination de l'humidité hygroscopique du sol. © Dahmani C. (2021).	44

16	Détermination du calcaire total. © (Dahmani C., 2021).	45
17	LECO Truspec 2000. © (Dahmani C., 2021).	48
18	Proportion des éléments granulométrique selon le mode d'occupation des sols. (%)	52
19	Variation du pH eau (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	54
20	Variation du pH KCL (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	55
21	Variation de la conductivité électrique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	55
22	Variations de la teneur en humidité hygroscopique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	56
23	Variation de la teneur en carbonate de calcium (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	57
24	Variation de la teneur en carbone organique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	58
25	Variation de la teneur en matière organique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	58
26	Variation de la densité apparente (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	59
27	Variations des stocks de carbone organique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	60
28	Variations des stocks de matière organique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.	61
29	Variation du pH eau (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.	63

30	Variation du pH KCl (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.	64
31	Variation de la conductivité électrique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.	65
32	Variation de la teneur en carbonate de calcium (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.	66
33	Variations de la teneur en humidité hygroscopique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.	66

34	Variation de la teneur en carbone organique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.	68
35	Variation de la teneur en matière organique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.	68
36	Variation de la porosité (0-30cm) des sols selon le mode d'occupation des sols.	69
37	Variations moyennes des paramètres physico-chimiques en fonction des modes d'occupation des sols et des profondeurs (0-5 cm et 0-30 cm).	73
38	Résultats de l'analyse post-hoc de Tukey des paramètres physico-chimiques selon les modes d'occupation des sols et la profondeur.	74
39	Résultats du test de Tukey sur les paramètres physico-chimiques selon le mode d'occupation des sols.	75
40	Résultats du test de Tukey pour les fractions granulométriques selon le mode d'occupation des sols.	77
41	Corrélation de Pearson entre les paramètres physico-chimiques du sol.	79
42	Graphique des variables de l'analyse en composantes principales (ACP) montrant les contributions des paramètres physico-chimiques et granulométriques du sol.	82
43	Biplot de l'analyse en composantes principales (ACP) montrant la distribution des paramètres physico-chimiques en fonction du mode d'occupation des sols. (la couleur noire représente les propriétés physico-chimiques du sol et les points colorés représentant les différents modes d'occupation du sol).	84
44	Biplot de l'analyse en composantes principales (ACP) montrant la distribution des paramètres physico-chimiques en fonction d'occupation du sol.	86
45	Dendrogramme du clustering hiérarchique.	87
46	Carte factorielle des groupes (clusters) de terrains selon les paramètres physico - chimiques du sol.	89

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
1	Moyenne mensuelle des précipitations relevées dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).	29
2	Moyenne mensuelle des températures relevée dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).	30
3	Les niveaux de classification de l'acidité du sol selon la classification USDA. (1971).	43
4	Classification de l'acidité du sol (Boubehziz, 2021).	43
5	Échelle d'interprétation de la teneur en carbonates de calcium (CaCO ₃) dans le sol. (Merabtene, 2021).	45
6	Classes d'abondance de la matière organique (Lambert, 1975).	46
7	Variation du rapport carbone/azote (C/N) selon les différents modes d'occupation des sols de la couche (0-5cm).	62
8	Variation du rapport carbone/azote (C/N) selon les différents modes d'occupation des sols de la couche (0-30cm).	70
9	Résultats de l'ANOVA pour les paramètres physico-chimiques selon le mode d'occupation des sols et de l'interaction terrain-profondeur.	72
10	Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) des fractions granulométriques selon le mode d'occupation des sols.	77

Liste des abréviations

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

CNULCD : Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification.

GES : gaz à effet de serre.

IPCC (GIEC) : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

CO₂ : dioxyde de carbone.

CH₄ : méthane.

N₂O : protoxyde d'azote.

MOS : matière organique du sol.

COS : carbone organique du sol.

CE : conductivité Electrique.

CaCO₃ : carbonate de calcium.

Dr : densité réelle.

Da : densité apparente.

T. AGR I : terrain agricole.

T. AGRO : terrain agroforestier.

T. FRUI : verger fruitier.

T.P.C : terrain pastoral conservé.

T.P.D : terrain pastoral dégradé.

T.P.S.N : terrain pastorale semi naturel.

T.U.R : terrain urbain.

Introduction générale

1. Introduction général :

La préservation des sols représente un enjeu majeur pour la durabilité des écosystèmes, Plusieurs stratégies ont été proposées afin de promouvoir une productivité optimale des cultures et de maintenir la qualité des sols (Draoui et al., 2018). Aujourd'hui, la conservation de la qualité des sols constitue une préoccupation croissante, notamment dans le contexte du changement climatique.

La santé des sols repose sur l'équilibre entre les processus physiques, chimiques et biologiques, ce qui permet d'améliorer à la fois la productivité agricole et la qualité de l'environnement (Awale et al., 2017). Selon la FAO (2015), les sols subissent des pressions anthropiques atteignant déjà des seuils critiques. Les activités humaines en particulier celles liées à l'agriculture, à la foresterie et à la gestion des terres, sont fortement influencées par les fluctuations climatiques. Toquebiau (2017) souligne que ces activités comptent parmi les plus sensibles au climat.

Mantano et al. (2015) montrent que la dégradation des sols, due principalement à des pratiques agricoles inadaptées, à l'urbanisation et à d'autres interventions humaines, constitue un problème mondial majeur depuis le XX^e siècle et continuera de représenter un défi central au XXI^e siècle. Cette dégradation concerne plusieurs composantes environnementales : sols, forêts, terres cultivées (irriguées et pluviales), prairies, ressources en eau, biodiversité et dynamiques des organismes vivants (FAO, 2015 ; Mantano et al., 2015).

Selon Cardinael et al. (2017), la disparition progressive des terres fertiles risque d'accentuer le déséquilibre des coûts alimentaires et de reléguer potentiellement des millions d'individus dans la pauvreté. D'après Yitbarek et al. (2013), les changements dans l'utilisation et la gestion des sols modifient souvent les caractéristiques physique, chimique, biologique et morphologique du sol. À cela le changement climatique est identifié comme un facteur important de la dégradation des sols (Dahmani et al., 2025).

En particulier, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄) issues de l'industrie, de l'agriculture et des incendies de forêts ont fortement augmenté au cours des 50 dernières années et devraient connaître une progression spectaculaire dans les 30 à 40 prochaines années (Qadir et al., 2024). Wen et al. (2025) soulignent que les propriétés des sols

influencent directement la croissance des cultures, leur résistance aux maladies et leur rendement.

La convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD) a pour sa part, alerté sur l'état alarmant de la dégradation des sols et a insisté sur la nécessité d'inverser cette tendance, de restaurer les écosystèmes détériorés et d'assurer une gestion durable des terres, afin d'atteindre un équilibre de non-dégradation. Il devient ainsi indispensable d'adopter de nouvelles approches de gestion durable des sols.

L'orientation actuelle vers une agriculture durable privilégie la modification des pratiques agricoles, avec pour objectifs de réduire la dépendance aux intrants chimiques et au labour intensif, de préserver la biodiversité des sols, d'accroître les stocks de carbone organique et d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques des sols (Mechri et al., 2023 ; Abdullatif et al., 2024 ; Benslama et al., 2024).

Les résultats de nombreuses recherches menées dans différentes zones climatiques montrent que la qualité des sols est fortement liée au degré de dégradation, aux pratiques d'utilisation et aux modes de gestion des terres. Étant donné que le sol constitue la ressource naturelle non renouvelable la plus précieuse (Bernoux et al., 2004 ; Kibet et al., 2022 ; Benslama et al., 2024 ; Abdullatif et al., 2024 ; Dahmani et al., 2025), il est essentiel de comprendre et de respecter ses mécanismes naturels pour développer une agriculture durable et respectueuse de l'environnement (Draoui et al., 2018 ; Ogunleye et al., 2025 ; Benslama et al., 2024).

Selon Chevallier et al. (2020), les sols africains, notamment ceux défrichés pour l'agriculture ou le pâturage, sont fortement affectés par des techniques agricoles inappropriées, des événements climatiques extrêmes (sécheresses, températures élevées) et des pratiques d'irrigation inefficaces. Ces facteurs altèrent la croissance des plantes, perturbent les processus liés à la matière organique et accentuent les phénomènes de dégradation physique, chimique et biologique des sols (Birhanu et al., 2016 ; Getahun et al., 2024).

La qualité des sols dépasse ainsi la seule dimension agricole et constitue désormais un enjeu environnemental majeur. La quantité et la qualité de la matière organique du sol (MOS) et du carbone organique du sol (COS) représentent des paramètres clés influençant la qualité des sols. Selon Verma et al. (2012), la MOS agit comme un régulateur fondamental de nombreuses contraintes environnementales, telles que la fertilité, la structure et la productivité agricole. Laban et al. (2018) confirment que des facteurs comme le climat, le type de sol, la couverture végétale et les modes de gestion conditionnent la séquestration du carbone organique (CO), à long terme (20 à 50 ans), l'augmentation du stock de carbone des sols et de la végétation exerce un impact positif sur l'environnement et l'agriculture.

Des pratiques agricoles durables telles que la réduction du labour, l'amélioration de la couverture végétale et la préservation des sols contribuent à améliorer la qualité de l'eau et de l'air (Amanuel et al., 2018). Par ailleurs, l'accumulation du COS dans les couches superficielles joue un rôle majeur en tant que puits de carbone, les premiers centimètres étant considérés comme la zone la plus dynamique des échanges sol-atmosphère (Benslama et al., 2024 ; Dahmani et al., 2025). Toutefois, le carbone profond reste rarement intégré dans les bilans de carbone ou les plans de gestion, notamment en Afrique du Nord (Bounoura, 2018).

En Algérie, les travaux portant sur l'état de la qualité des sols, la matière organique, sa stabilisation et son évolution sous l'influence des modes d'occupation des sols demeurent limités et se concentrent surtout sur des caractérisations préliminaires. Merabtene et al. (2020) ont estimé la quantité de CO stockée dans les sols forestiers et analysé l'impact des types de végétation, le stockage du carbone dans les sols du mont Tessala. De leur côté, Benslimane et al. (2023) ont évalué le COS à différentes profondeurs et pour divers usages des terres dans la plaine de Sidi Bel Abbès, tandis que Bensid (2015) a étudié l'effet de la végétation sur la MOS. Dans ce contexte, la présente étude a été réalisée dans le Nord-Est de l'Algérie, reconnu comme un point chaud de biodiversité de la région méditerranéenne (Vèla et Benhouhou, 2007). Compte tenu des effets combinés du changement climatique, des modifications de l'occupation des sols, des pratiques de gestion non durables et de la vulnérabilité de la région, une compréhension approfondie des réponses des sols s'avère nécessaire. Cette connaissance constitue une base essentielle pour orienter l'élaboration de stratégies de gestion adaptées, capables de limiter la dégradation des sols et de favoriser le stockage du carbone et la qualité du sol (Lisec et al., 2024).

Problématique et objectifs de la Thèse :

Le présent travail vise à étudier les caractéristiques physico-chimiques des sols en surface et en profondeur, en relation avec les changements des modes d'occupation des sols.

Les principales questions de recherche sont :

- Comment les changements d'occupation des sols tels que la conversion des milieux naturels en milieux cultivées et la profondeur affectent-ils les propriétés physico-chimique des sols ?
- Quelles sont les teneurs et les stocks organiques des sols dans la région d'étude en surface et en profondeurs ?
- Quelles sont les corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques du sol ?

Cette étude vise à répondre aux questions de recherche énoncés précédemment en se fixent les objectifs suivants :

- Caractériser les propriétés physico-chimiques des sols.
- Quantifier les variations de la teneur en MOS et suivre sa dynamique en surface et en profondeurs.
- Évaluer l'impact des modes d'occupation des sols, la profondeur sur les teneurs en MO et identifier les facteurs anthropiques et de gestion influençant leur variabilité, mettant en évidence les interactions entre ces facteurs et les paramètres du sol.

Pour cela nous avons adopté cette démarche qui consiste à :

•**Chapitre 1** : Une synthèse bibliographique sur l'impact du changement climatique sur les propriétés des sols et les réserves organiques. En mettent en évidence une meilleure compréhension sur les interactions entre climat-sol et modes d'occupation des sols, profondeur, couvert végétal. Cette perspective ouvre la voie à l'identification des stratégies plus durables pour préserver la qualité des sols, intègrent les enjeux climatiques et leur influence à long-terme pour la conservation des sols.

•**Chapitre2** : Présentation de la région d'étude comprennent : une description pédologique, géologique, climatique, couverture végétale.

•**Chapitre3** : Méthodologies de la recherche. Comprennent une description approfondie des différents techniques d'analyse utiliser pour évaluer les propriétés des sols.

• **Chapitre 4** : Analyse statistique, interprétation des résultats obtenus, ces résultats vont être expliquées et discutées dans la même partie en comparant avec d'autres études effectuées au bassin méditerranéen ou sur la partie Nord-Est de l'Algérie, résume les principales conclusions et résultats de ce travail et des recommandations pour les études futures.

Chapitre I. Revue bibliographique

Chapitre. 1. Revue bibliographique

1.1. Le concept et les perspectives futures de la santé du sol :

Selon Lehmann et al. (2020), le sol est un système complexe situé à l'intersection de l'atmosphère, de la lithosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère. Il joue un rôle essentiel dans la production alimentaire et contribue de manière significative à la durabilité en soutenant des services écosystémiques importants. Bünemann et al. (2016) soulignent que le sol ne se limite pas à ses composantes physiques mais résulte également des interactions dynamiques entre ses éléments physiques, biologiques et chimiques.

Les caractéristiques d'un sol déterminent ainsi son rôle en tant que fondement des écosystèmes naturels ou gérés par l'homme. Lorsque l'on aborde la santé des sols, l'attention se porte principalement sur les processus qui déterminent son fonctionnement et sur l'influence exercée par les activités humaines (Lehmann et al., 2020). Selon Bünemann et al. (2016), la qualité du sol constitue l'une des trois composantes principales de la qualité de l'environnement, aux côtés de la qualité de l'eau et de l'air. Alors que ces dernières sont principalement définies par leur degré de pollution, qui impacte directement la santé humaine, animale et les écosystèmes naturels, la qualité du sol est généralement perçue de manière plus globale. Elle fait référence à la capacité d'un sol à fonctionner dans les limites de son écosystème et de son utilisation pour soutenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement, et favoriser la santé des plantes et des animaux. Cette définition met en évidence les nombreux liens entre le fonctionnement du sol et les services écosystémiques qu'il soutient, tout en reflétant la grande complexité et la spécificité des écosystèmes pédologiques.

La qualité du sol est en effet, plus complexe que celle de l'air et de l'eau, non seulement parce qu'il s'agit d'un mélange de phases solide, liquide et gazeuse, mais aussi en raison de ses multiples fonctions potentielles. Par conséquent, la qualité du sol doit être définie en fonction de la fonction souhaitée (Bünemann et al., 2016).

Les propriétés des sols, ainsi que les processus qui s'y manifestent, régulent leur rôle dans les cycles biogéochimiques des systèmes sol-plante et des écosystèmes continentaux en général. Leur fonctionnement influence également la qualité des eaux, la production végétale et l'atmosphère. Ces aspects dépendent, entre autres, du type de fonctionnement des sols, lequel est le résultat des interactions mentionnées précédemment. Le concept de qualité du sol attribue une importance particulière à la MOS, considérée comme un attribut clé qui influence de nombreuses fonctions essentielles du sol.

La teneur en MOS est vitale, car elle fournit l'énergie, les substrats et la diversité biologique nécessaires au maintien de nombreuses fonctions pédologiques (Franzluebbers, 2002).

1.2. La notion du sol : sa formation et son évolution :

Selon Grosbellet (2008), le sol est la couche supérieure de la croûte terrestre, constituée de minéraux, de MOS, d'eau, d'air et d'organismes vivants. Son atmosphère interne est spécifique, et il abrite une flore et une faune particulières.

Les sols résultent de la transformation et de l'altération des roches par l'action de la vie, de l'atmosphère, ainsi que des échanges d'énergie qui s'y produisent. Ils forment des systèmes dynamiques complexes qui évoluent constamment sous l'influence de processus pédogénétiques relativement lents, bien que des événements ponctuels, comme une érosion rapide due à un événement climatique violent, puissent accélérer leur évolution.

Ces sols peuvent également se détériorer (Duchaufour, 1997). D'après Baize et al. (1995), la description des sols permet de définir des horizons, qui sont des subdivisions homogènes, tant au niveau de leurs composants que pour leur classification. Les sols sont souvent altérés par l'activité humaine comme l'agriculture au point que le sol naturel initialement présent n'est parfois plus reconnaissable.

Pour identifier l'intervention humaine, Baize et Rossignol (1995) ont introduit le concept de processus anthropo-pédogénétiques. Pour caractériser ces sols modifiés ou entièrement artificiels, une classe supplémentaire a été ajoutée aux référentiels pédologiques. Sur le plan fonctionnel, les sols peuvent être définis comme des systèmes dynamiques, complexes et quadridimensionnels (espace-temps), qui regroupent cinq types principaux de « composants » : les matières solides minérales et organiques, les organismes vivants (plantes, faune, micro-organismes), les solutions et les gaz. Ces composants interagissent plus ou moins intensément entre eux.

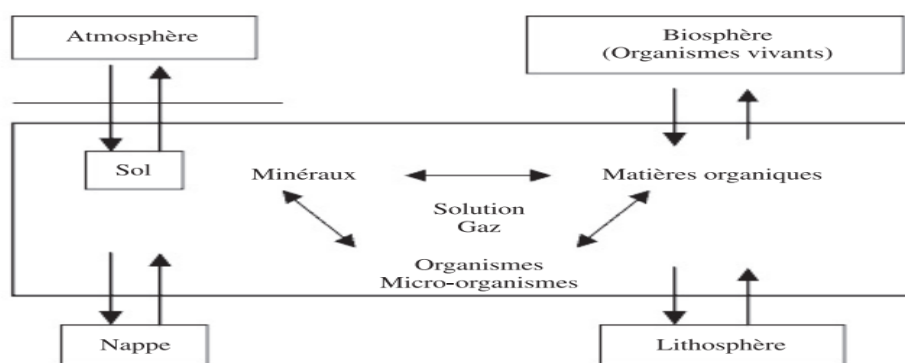


Figure 01 : Le sol : élément central de la biosphère et régulateur des grands équilibres (Girard et al., 2011).

D'après Braun et Kruijne (1994) les facteurs de formation du sol :

1.2.1. Le climat :

Le climat joue un rôle essentiel dans la formation du sol, où les deux principaux facteurs sont les précipitations et la température. Dans les climats chauds et humides, le taux de formation du sol est élevé car les conditions climatiques sont propices à la présence d'agents biologiques. En revanche, dans les climats froids et secs, l'altération chimique est lente, et les conditions climatiques ne favorisent pas le développement biologique, ce qui ralentit la formation du sol. Dans les climats chauds et secs, le développement des sols résulte principalement de l'altération physique, qui fragmentent les roches. Les sols formés dans des climats froids et humides sont généralement fins et légèrement humides, développés sous l'effet physique du gel et du dégel.

1.2.2. La roche mère :

Les sols se forment en fonction du climat, du relief et sur une roche mère spécifique. La nature de la roche mère sous-jacente joue un rôle majeur dans la formation et le développement du sol, influençant grandement ses propriétés physiques et chimiques.

1.2.3. La topographie :

Selon Boubehziz (2021), la topographie décrit la structure du relief terrestre, influencée par la différence d'altitude et le relief. L'altitude joue un rôle clé dans la formation du sol, en affectant le mouvement de l'eau et le déplacement des matériaux. Les facteurs tels que la température, l'humidité et la pente ont un impact direct sur la formation du sol, sa texture, sa structure, ainsi que sa composition chimique et organique.

1.2.4. Les organismes :

Les organismes jouent un rôle crucial dans la formation du sol. On peut les classer en plusieurs groupes :

- Micro-organismes (comme les moisissures et les champignons)
- Plantes supérieures (végétation naturelle ou cultures)
- Vertébrés (comme les taupes), mésofaune (vers de terre, fourmis, termites)

Ces organismes contribuent à créer des conditions humides dans le sol, et les températures élevées stimulent leur activité biologique. Ils participent à la transformation et à la translocation de la matière organique, tout en favorisant l'aération et la perméabilité grâce aux trous et aux canaux qu'ils creusent.

1.2.5. Le temps :

Le temps joue un rôle fondamental dans la formation du sol. Dans les régions tropicales humides, où les précipitations abondantes et les températures élevées sont prédominantes, il est particulièrement déterminant.

1.2.6. Les activités humaines :

Les activités humaines ont également un impact significatif sur la formation du sol. On retrouve :

- L'utilisation des fertilisants et le ruissellement dans le sol-eau.
- Le mélange des horizons avec des propriétés variées grâce au labour.
- La modification du statut nutritif par la fertilisation ou l'épuisement des nutriments.
- La salinisation due à une gestion déséquilibrée de l'eau.

1.3. Propriétés des sols : Perception et analyse scientifique :

Les caractéristiques physico-chimiques du sol jouent un rôle clé dans la régulation de la qualité des sols. Par exemple, la présence d'argile protège le COS de l'oxydation microbienne, limitant ainsi les flux de carbone et favorisant sa stabilité. De même, la capacité de rétention d'eau, le pH et les nutriments du sol, tels que l'azote et le phosphore, influencent également les niveaux de COS (Guo et al., 2020 ; Kibet et al., 2022).

Toutefois, les modifications des caractéristiques physiques et chimiques du sol, telles que la structure, la densité apparente, la taille des pores et la fertilité, peuvent avoir un impact direct sur la productivité des cultures (Francaviglia et al., 2023). En outre, la stabilité des agrégats, la dégradation des particules, la MOS et la densité des particules affectent directement la densité apparente et la porosité du sol.

Une diminution de la MOS entraîne une augmentation de la densité apparente et une réduction de la porosité, réduisant ainsi les capacités d'infiltration et de stockage de l'eau et de l'air (Vandana et al., 2023). Selon Xiao (2015), la texture du sol influence également la

minéralisation nette de la MOS et la quantité de COS stockée. Par exemple, les sols sableux présentent une décomposition plus rapide de la MOS que les sols argileux.

Chaque sol possède un potentiel de stockage de carbone spécifique, déterminé par la nature de la végétation, les conditions climatiques et les propriétés physico-chimiques du sol (Six, 2002 ; Haghdoost et al., 2013). En plus les réserves de COS présentes dans le sol contribuent significativement à la qualité et à la fonctionnalité des sols dans les écosystèmes. Elles améliorent notamment les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Keesstra et al., 2016 ; Smith et al., 2016 ; Muñoz et al., 2017).

1.4. Contributions des sols face aux changement climatique :

1.4.1. Définition et concepts généraux :

Le COS désigne le carbone contenu dans la MOS. Cette MO représente la fraction organique constituée de matières végétales et animales décomposées, ainsi que d'organismes microbiens, mais exclut les matières végétales fraîches et non décomposées, telles que la paille. Selon Raharimalala et al. (2013), le COS joue un rôle clé dans le stockage des éléments nutritifs, leur mise à disposition pour les plantes par le processus de minéralisation, et la stimulation de l'activité biologique du sol.

Par ailleurs, le carbone du sol peut également exister sous des formes inorganiques, telles que la chaux ou les carbonates, particulièrement présents dans les sols des régions arides (Chan, 2008). Lors de la décomposition de la MO, une partie du carbone est libérée dans l'atmosphère sous forme de CO₂, tandis qu'une autre partie est stockée dans le sol (Rasmussen & Parton, 2020). Dans les écosystèmes terrestres, la quantité de carbone stockée dans le sol dépasse généralement celle contenue dans la végétation vivante. Il est donc essentiel de comprendre la dynamique du carbone dans le sol et son rôle dans le bilan carbone des écosystèmes terrestres ainsi que dans le cycle global du carbone (Post et Kwon, 2000).

En outre, selon Atchada et Akplo (2022), l'évolution des stocks organiques des sols à moyen et long terme constitue un indicateur essentiel pour évaluer la durabilité des agroécosystèmes et la préservation de l'environnement.

D'après Lal (2004), l'amélioration de la qualité et de la quantité des stocks de COS peut accroître la production agricole et la biomasse, améliorer la qualité de l'eau, réduire la sédimentation des cours d'eau et des réservoirs, et contribuer à l'atténuation des effets du réchauffement climatique.

1.5. Les fonctions de la matière organique dans les sols :

D'après Murphy (2014). Les fonctions de la MOS peuvent être résumées comme suit :

1.5.1. Fonctions physiques :

- Améliore la stabilité structurelle des sols.
- Influence les propriétés hydrologiques du sol, telles que la capacité de rétention d'eau. Les propriétés d'infiltration et les conductivités hydrauliques du sous-sol et des couches du sous-sol.
- Améliore la friabilité et l'épaisseur du sol tout en réduisant sa résistance.
- Améliore l'aération et modifier les propriétés thermiques.

1.5.2. Fonctions chimiques :

- Contribue à la capacité d'échanger cationique du sol.
- Améliore la capacité du sol à faire face aux changements de pH.
- Former des complexes de cations et d'anions qui peuvent diminuer la présence d'agents toxiques comme l' Al^{3+} dans la solution du sol.
- Diminuer la disponibilité d'agents toxiques comme l' Al^{3+} dans la solution du sol.
- Maintenir la disponibilité des nutriments tels que le phosphore sous une forme disponible et empêcher qu'ils ne deviennent indisponibles.
- Favorise la liaison de la MOS aux minéraux du sol.
- Interagit avec les herbicides et les pesticides.

1.5.3. Fonctions biologiques :

- Fournit aux micro-organismes qui sont essentiels aux processus biologiques dans le sol une source d'énergie et de nourriture.
- Maintenir un réservoir important d'éléments nutritifs (principalement l'azote, mais également le phosphore, le soufre et les oligo-éléments) qui sont disponible pour la plante lors de processus de décomposition qui est important au recyclage des nutriments.
- Peut contribuer à la lutte biologique contre les organismes pathogènes.

1.6. Facteurs contrôlent les stocks organiques :

Synthèse des données bibliographiques indiquant la variation du stock organique en fonction de la profondeur du sol, le mode d'occupation des sols, le climat, les propriétés des sols.

1.6.1. Le mode d'occupation des sols – la profondeur :

Le taux de renouvellement des composés organiques varie en raison des interactions complexes entre les processus biologiques, chimiques et physiques dans le sol (Post et Kwon, 2000). La teneur en COS peut augmenter ou diminuer en fonction de divers facteurs, tels que le type de sol, les caractéristiques du profil, le niveau de matière organique, les variables climatiques, la topographie, la diversité fonctionnelle et l'activité biologique des sols, ainsi que les pratiques de gestion (Lal, 2004 ; Post et Kwon, 2000).

Selon Schuman et al. (2002), diverses interventions humaines influencent les stocks de COS et l'activité biologique. Maintenir ou augmenter les niveaux de COS nécessite des efforts tels que le retour de MO dans le sol, l'adoption de rotations avec des cultures à enracinement profond ou dense, et l'utilisation de cultures à haute teneur en résidus.

Les changements d'utilisation des sols peuvent avoir un impact significatif sur le stockage du carbone à une échelle allant de plusieurs décennies à plusieurs siècles (Scott et al., 2023 ; Merabtene, 2022).

Les variations des stocks de carbone sont causées par des processus tels que la modification des apports de MO, les transferts sous forme solide (érosion) ou soluble (lixiviation, ruissellement) et les pertes par minéralisation (émission de CO₂ et CH₄) (Bot et Benites, 2015 ; Bernoux et al., 2004).

Les sols jouent un rôle clé dans la gestion des stocks et flux de CO. Une agriculture durable peut améliorer le stockage de carbone dans le sol tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (Smith, 2012 ; Sommer et al., 2018 ; Kim, 2016 ; Kibet et al., 2022). Des études montrent que la teneur en COS varie en fonction de l'usage des terres et de la profondeur du sol. Par exemple, Jiménez et al. (2008) et Merabtene (2022) ont constaté que les champs de canne à sucre présentaient une teneur en COS plus élevée dans la couche arable (0-10 cm) que les savanes. Les travaux de Kibet et al. (2022) ont quantifié les stocks de carbone en fonction de différents types d'utilisation des sols au Kenya, révélant que les stocks diminuent avec la profondeur, les valeurs étant plus élevées dans les 15 premiers centimètres de sol. Selon (Franzluebbbers, 2002 ; Babur et al. 2021 ; Gualberto et al. 2023) l'augmentation du COS dans la couche arable est essentielle pour améliorer la qualité et la productivité du sol. Tedone et al.

(2023) ont démontré que les concentrations de COS varient significativement en fonction de la gestion et de la profondeur du sol. Des pratiques telles que l'application de fumier organique, le travail réduit du sol, les cultures de couverture et les rotations diversifiées favorisent la séquestration du carbone (Diacono et Montemurro, 2010 ; Abbas et al., 2020).

Cependant, augmenter la MOS reste difficile dans des conditions spécifiques, notamment dans les sols bien aérés, des régions chaudes et arides. À l'inverse, les sols à texture fine des régions tempérées humides retiennent mieux le COS en raison d'une aération limitée (Lal, 2004 ; Post & Kwon, 2000). Les modifications d'utilisation des sols, comme la conversion de forêts naturelles en terres cultivées, réduisent souvent les stocks de COS, bien que certaines pratiques agroforestières puissent les préserver ou les améliorer (Fujisaki et al., 2015 ; Bounoura, 2018). D'autres études, telles que celles de Haghdoost et al. (2013) et Doetterl et al. (2016), ont montré que les forêts naturelles stockent plus de carbone que les terres agricoles en raison de leur biomasse aérienne et souterraine.

En revanche, l'agriculture peut induire une érosion accrue et une décomposition accélérée du COS. En conclusion, l'histoire des sols, les conditions environnementales, les pratiques culturales et la dynamique des MOS influencent fortement les stocks de COS. Il est impératif d'adopter des stratégies adaptées pour atténuer les pertes de carbone et promouvoir la séquestration, notamment dans le contexte du changement climatique (Fenni et Machane, 2010 ; Lal, 2008).

1.6.2. Le climat :

Le temps de résidence du carbone dans le sol dépend des conditions climatiques telles que la température, l'humidité, l'aération ... etc. qui favorisent la plupart des processus biologiques concernant les MOS et en particulier leur minéralisation (Bounoura, 2018). Les variations du climat provoquent des modifications dans la distribution du COS souterrain, incluant des modifications dans l'accumulation de carbone récemment formé dans les sols profonds (Chen et al., 202 ; Zhu et al., 2021 ; Li et al., 2023). Selon (Zhong et al., 2020 ; Li et al., 2023) le stockage de SOC augmente à des températures plus basses, dans les climats froids et humides qui se distinguent par une forte teneur en COS. D'après (Wang et al., 2014 ; Guo et al., 2017 ; Li et al., 2023) la hausse des températures mondiales a provoqué une baisse du taux de rotation de la MOS et une réduction du temps de résidence du COS. Selon (Li et al., 2023) le changement climatique affecte les décisions des cultures entraîne une modification d'évaporation en surface et l'utilisation de l'eau ce qui est posé des défis à la séquestration du carbone dans le sol et la croissance des cultures en affectant l'activité microbienne est la fertilité du sol (Lal, 2004) ont

évaluer l'impact du changement climatique projeté dans le bassin méditerranéen ont prédit qu'une augmentation de 3° C de la température entraîne un déplacement altitudinal des ceintures de végétation de 500 m et une réduction de 28 % de la réserve du COS dans la couche supérieure de la zone humide, de 20 % de la zone sous-humide et 15 % de la zone aride. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans certaines régions d'Afrique et d'Asie. Les systèmes écologiques les plus exposés sont les moins capables à s'adapter, risquent de connaître des périodes sèches plus longues et plus rigoureuses, ainsi que l'humidité des sols sera affectée par l'évolution du régime des précipitations (Machado et al., 2024).

1.6.3. Les propriétés des sols :

Les propriétés du sol sont influencées par des variations d'humidité et de température, impactant la composition des espèces présentes dans l'écosystème. Ces variations affectent également la biomasse retournée au sol, qu'il s'agisse de détritux ou de biomasse aérienne et souterraine (Lal, 2004). Par ailleurs, la variabilité des stocks de carbone dépend fortement des caractéristiques physiques du sol, notamment la texture et la porosité. Plusieurs études ont mis en évidence une corrélation positive entre le stockage du COS et la quantité de particules fines dans le sol (Arrouays et al., 2006 ; Bounoura, 2018 ; Merabtene, 2021). Selon Saïdy (2013) et Kibet (2022), Une étude menée par Burke et al. (1989) aux États-Unis a révélé que le COS augmentait avec la quantité d'argile, sur la base de données pédologiques et climatiques collectées dans 500 parcours et 300 sols cultivés des Grandes Plaines.

La stabilisation et la protection biochimique de la MOS dépendent de sa composition chimique complexe, laquelle offre une résistance à la décomposition microbienne. Cette composition peut être influencée par les résidus végétaux, les processus de condensation, la complexation chimique, ainsi que par l'action des populations microbiennes et des invertébrés, qui participent à l'acquisition de la stabilité (Christensen, 2001 ; Six et al., 2002 ; Xiao, 2015). Les composés récalcitrants, tels que la lignine et les polyphénols, et les processus de complexation chimique, comme les réactions de condensation, jouent également un rôle essentiel dans cette stabilisation.

1.7. Le carbone organique est le principal constituant de la matière organique :

Le COS comprend les résidus végétaux, animaux et microbiens à différents stades de décomposition. Les particules inorganiques du sol interagissent étroitement avec ces composés organiques, influençant leur stabilité et leur renouvellement. Le taux de décomposition et de

stockage des composés organiques varie selon des interactions complexes entre facteurs chimiques, biologiques et physiques.

Dans les écosystèmes terrestres, les sols stockent généralement davantage de carbone que la végétation vivante, ce qui souligne l'importance de comprendre la dynamique du COS pour maintenir l'équilibre des écosystèmes terrestres et réguler le cycle global du carbone (Post et Kwon, 2000). Le COS joue un rôle central dans les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols, contribuant à leur fertilité, leur stabilité structurelle et leur capacité à fournir des services écosystémiques (Bongiorno et al., 2019 ; Kooch et al., 2020 ; Gualberto et al., 2023). Lors de la décomposition de la MOS, une partie du carbone est stockée dans le sol, tandis qu'une autre est libérée sous forme de CO₂ dans l'atmosphère (Rasmussen et Parton, 1994 ; Fenni et Machane, 2010).

1.8. Le terme séquestration du carbone

La séquestration du carbone dans les sols est un terme souvent utilisé dans le contexte de du changements climatiques. L'atténuation des changements climatiques a été définie comme une intervention humaine pour réduire les émissions ou améliorer les puits de serre gaz. (IPCC,2021 ; Don et al.,2024).

Dans le sol la séquestration du carbone fait référence à l'élimination du CO₂ atmosphérique par les plantes et le stockée par la MO fixée dans le sol. La stratégie consiste à augmenter la densité de CO dans le sol, à améliorer sa distribution en profondeur et stabiliser le COS en l'encapsulant dans des micro-agrégats stables de sorte que le C soit protégé des processus microbiens ou en tant que C récalcitrant avec un long temps de renouvellement Lal (2004).

La séquestration du carbone est définie par le GIEC : comme le processus d'augmentation de la teneur en C d'un pool de C autre que l'atmosphère (IPCC.,2021 ; Don et al.,2024). En autre, pour le sol spécifiquement, la séquestration de C dans les sols est décrite par Olson et al. (2014) comme « processus de transfert du CO₂ de l'atmosphère dans le sol d'une unité terrestre à travers les plantes, les résidus végétaux et d'autres solides organiques, qui sont stockés ou conservés dans l'unité dans le cadre de la MOS ». Cela signifie que pour la séquestration du C dans les sols pour se produire, le CO₂ doit être extrait de l'atmosphère et converti en C organique via les activités métaboliques des autotrophes, puis doit entrer le sol soit directement (matière végétale et résidus végétaux produits sur le même site) ou indirectement (MO d'origine végétale comme le fumier ou du compost provenant principalement d'autres sites) en quantité suffisante compenser les pertes causées par la respiration et entraîner une augmentation nette du stock de C dans le sol (Don et al.,2024).

Le rôle du sol comme source ou puits de carbone dépend de l'utilisation du sol et pratiques de gestion. Selon Abbas et al., 2020 la séquestration du carbone » et un processus qui capture le carbone de l'atmosphère et le stocke dans le sol en utilisant des plantes ou des résidus organiques ». Prakash et Shimrah (2023) ont défini la séquestration du carbone terrestre comme le transfert net de CO₂ atmosphérique dans réservoirs de carbone au fil du temps.

1.9. La séquestration du carbone dans le contexte du changement climatique :

D'ici 2050, la population mondiale devrait atteindre 9 milliards d'habitants, ce qui nécessitera une augmentation de 60 % de la production alimentaire pour répondre à la demande. Cependant, environ 1,8 milliard de personnes vivront dans des zones souffrant de stress hydrique sévère. Parallèlement, les activités agricoles intensives provoquent une dégradation des terres à un rythme alarmant (Laban et al., 2018). Les préoccupations croissantes concernant le réchauffement climatique et l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), notamment le CO₂, le CH₄ et le N₂O, incitent à étudier le rôle des sols en tant que source ou puits de carbone, toute modification de l'utilisation des sols ou des pratiques agricoles influe directement sur les stocks de COS.

Les sols jouent un rôle fondamental dans la réduction de l'enrichissement en CO₂ atmosphérique, agissant comme un puits naturel de carbone dont l'importance est cruciale. Toutefois, une interdépendance forte existe entre le climat et la qualité des sols (Akpa et al., 2016 ; Pham et al., 2018 ; Jibrin et al., 2023). La dégradation des sols, qu'elle soit physique, chimique ou biologique, réduit les stocks de COS, épuise les sols et entraîne une augmentation des émissions de GES (Bernoux et al., 2004). Elle diminue également la production de biomasse et la quantité de MO retournée au sol, affectant ainsi la qualité du sol et le cycle des nutriments (Krull et al., 2004 ; Laban et al., 2018). La biodiversité des sols et le COS sont essentiels au fonctionnement des écosystèmes et à la multifonctionnalité des terres, influençant directement la production alimentaire, la régulation de l'eau et l'atténuation du changement climatique. La MOS est essentielle à la santé des sols. Ses fonctions clés incluent la productivité primaire, la régulation de l'eau, la séquestration du carbone, la biodiversité et le recyclage des nutriments. La MOS influence de manière significative les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, en particulier dans les sols arables et les cultures maraîchères (Grand et Michel, 2020). Pour augmenter les stocks de carbone dans le sol, diverses stratégies de gestion durable sont recommandées, notamment : la restauration des sols et des forêts, l'agriculture sans labour, l'utilisation de cultures de couverture, une gestion optimisée des nutriments, l'épandage de fumier et de boues, l'amélioration des pâturages, et des pratiques agroforestières (Lal, 2004).

Ces pratiques permettent d'accroître les apports de MOS, de réduire les pertes par érosion ou lixiviation, et de limiter la minéralisation excessive (Bernoux et al., 2004). Ainsi, la séquestration du carbone dans les sols se présente comme une solution prometteuse pour réduire les concentrations de GES atmosphériques. Elle offre des avantages multiples sur les plans économique, environnemental et agronomique, tout en contribuant à la lutte contre le changement climatique (Bernoux et al., 2004).

1.10. Approches de séquestration du carbone :

1.10.1. Séquestration naturelle, biologique ou terrestre du carbone :

La séquestration du carbone terrestre, également connue sous le nom de séquestration biologique, implique l'application de pratiques de conservation dans les sols et les forêts afin d'améliorer le stockage du carbone (Margal et al.,2023). Ces pratiques incluent La restauration de la forêt, la création de nouvelles forêts, la préservation des terres humides et les prairies également les efforts visant à réduire les émissions de CO₂, comme réduire le travail du sol agricole et contrôler les feux de forêt. (Margal et al.,2023).

Par exemple, la conversion des terres agricoles en forêts ou en terres humides peut améliorer la séquestration du carbone, favoriser l'habitat faunique et améliorer la qualité de l'eau. Cependant, cette conversion peut également entraîner une réduction des surfaces agricoles. À l'inverse, la conversion de terres naturelles en cultures intensives, notamment pour la production de biocarburants, peut réduire les habitats naturels, dégrader la qualité de l'eau et augmenter les émissions de CO₂.

La séquestration du carbone terrestre offre de nombreux avantages supplémentaires, tels que l'amélioration de la qualité des sols et de l'eau, la restauration des écosystèmes dégradés et l'augmentation du rendement des cultures. Il est courant d'utiliser les expressions « gagnant-gagnant » ou « sans regret (Margal et al.,2023).

Selon Gonzalez et al. (2019) et Francaviglia et al. (2023), la séquestration du carbone dans les sols diffère en fonction des conditions climatiques locales, des caractéristiques du sol, des niveaux initiaux de COS, du type de culture (arable par rapport aux systèmes de culture ligneux), de la gestion antérieure et actuelle (pluviale par rapport aux systèmes d'irrigation, des systèmes d'entrée faibles par rapport aux systèmes d'entrée élevés), ainsi que de la durée des expériences.

Néanmoins, l'augmentation du COS dans les sols est limitée dans le temps par un seuil de saturation en carbone. Au-delà de ce seuil, le taux d'accumulation ralentit progressivement

jusqu'à atteindre un plateau, en fonction du type de sol, de la durée de croissance et des conditions climatiques.

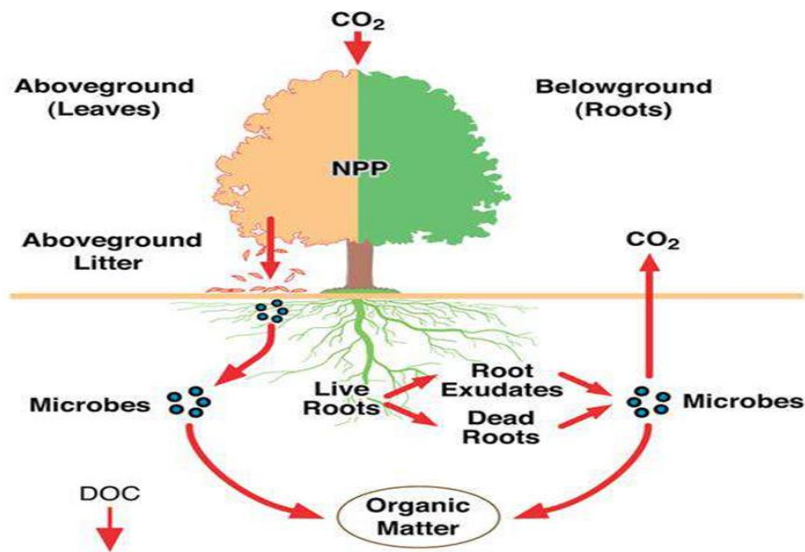


Figure 02: Séquestration naturelle, biologique ou terrestre du carbone (Margal et al.,2023).

1.10.2. Photosynthèse et écosystèmes terrestres :

La photosynthèse est le processus par lequel les plantes absorbent le CO₂ de l'atmosphère, le transforment en composés organiques et le stockent dans leur biomasse, constituant ainsi le mécanisme principal de la séquestration naturelle du carbone. Les écosystèmes qui contribuent le plus à cette séquestration par photosynthèse sont principalement les forêts, les prairies et les zones humides.

1.10.3. Stockage du carbone dans les sols :

La séquestration du carbone dans le sol peut entraîner un stockage de carbone dans le sol à long terme. La MO se décompose, lorsque les plantes perdent des feuilles rejetant du CO₂ dans l'atmosphère. Cependant, une partie de la matière peut être incorporée dans le sol par des processus tels que la stabilisation physique et la décomposition microbienne.

1.10.4. Boisement et reboisement :

Pour augmenter la séquestration du carbone, le boisement et le reboisement impliquent la plantation de nouvelles forêts ou la restauration de forêts dégradées. La photosynthèse, qui

stocke du carbone dans la biomasse et le sol, est la méthode par laquelle les arbres absorbent le dioxyde de carbone. Ces activités ne séquestrent pas seulement le carbone, mais offrent également des avantages tels que la conservation de la biodiversité, la régulation de l'eau et la protection des sols.

1.11. Conservation et gestion durable des sols :

Des recherches récentes montrent que l'adoption des pratiques de gestion adaptées dans les zones méditerranéennes joue un rôle important dans l'atténuation du changement climatique, en raison de leur potentiel de séquestration du COS (Aguilera et al.,2013 ; Muñoz et al.,2016). L'efficacité des technologies recommandées pour la séquestration du carbone organique et l'amélioration de la qualité des sols varie en fonction de la texture et de la structure du sol, précipitations, de la température, du système agricole et de la gestion des sols (Lal.,2004).

En effet, les pratiques qui améliorent la qualité du sol permettent d'obtenir de meilleurs rendements grâce à des effets positifs sur la capacité de rétention en eau, la capacité d'échange cationique, la stabilité des agrégats et la sensibilité à l'érosion (Torquebiau.,2016).

L'agriculture de conservation constitue un exemple de pratiques agroécologiques résistante au changement climatique. Elle regroupe différentes méthodes agricoles visant à préserver le sol contre l'érosion, à améliorer sa structure et à favoriser son enrichissement en (MOS), ce qui renforce sa capacité de stockage du carbone. Elle contribue également à améliorer la fertilité des sols et à optimiser l'utilisation de l'eau en favorisant l'infiltration et en réduisant l'évaporation, ce qui améliore la résistance à la sécheresse.

Parmi ces pratiques figurent la restauration des sols et des forêts, le semis direct, les cultures de couverture, la gestion des nutriments, l'apport de fumier et de compost, l'amélioration du pâturage, la collecte et la conservation de l'eau, l'irrigation efficace, les systèmes agroforestiers, ainsi que la mise en culture de terres marginales à des fins énergétiques (Lal, 2004 ; Githongo et al., 2022 ; Duman, 2023).

Selon le GIEC, les activités liées à l'agriculture, à la foresterie sont responsables d'environ 24 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Ainsi, la séquestration du carbone dans les différents usages des sols, notamment agricoles, constitue un enjeu mondial majeur pour réduire la concentration atmosphérique de ces gaz.

Nguyen et al. (2018) considèrent l'agroforesterie comme l'une des options privilégiées parmi les approches d'adaptation au changement climatique, et comme un pilier de l'agriculture

intelligente face au climat (Nyasimi et al., 2015 ; Williams et al., 2015 ; Boukeng, 2021 ; Zhang et al., 2023).

L'agroforesterie peut être définie comme un système permettant de réduire les effets du changement climatique grâce à la séquestration du carbone et à la mise en œuvre d'actions telles que : (i) la réduction de la déforestation, (ii) la limitation de la dégradation forestière, (iii) la gestion durable des forêts, (iv) l'augmentation des stocks de carbone forestier par le reboisement et l'agroforesterie, et (v) la conservation des stocks de carbone. Selon Scholte (2012), dans le parc national de Bouba Ndjida, la conversion des espaces naturels en systèmes agroforestiers constitue l'une des principales causes de dégradation, bien que les effets sur le stockage du carbone restent encore peu documentés (Djongmo et al., 2019 ; Boukeng, 2021).

Les Objectifs de Développement Durable visent notamment à améliorer la qualité des sols, à lutter contre le changement climatique et à restaurer les terres dégradées, tout en renforçant l'accès et le contrôle des ressources foncières (Osborn et al., 2015). La promotion de pratiques de gestion durable des terres intégrant des dimensions biophysiques, socio-économiques et de gouvernance constitue une stratégie essentielle pour préserver les ressources terrestres tout en assurant leur productivité et leurs services écosystémiques.

Chapitre. II. Présentation de la région d'étude

Chapitre.2. Présentation de la région d'étude

2. Critères de choix de la région d'étude :

Ce chapitre a pour objectif de situer la zone d'étude dans son contexte naturel et régional, en l'occurrence à l'extrême nord-est de l'Algérie. Il vise également à présenter les principaux facteurs naturels susceptibles d'influencer les caractéristiques des sols, tels que la géologie, la géomorphologie, l'hydrogéologie, le climat, entre autres.

La zone d'étude se situe dans le Nord-Est de l'Algérie (Figure 03), une région méditerranéenne caractérisée par une grande diversité écosystémique dotée d'une richesse biologique inestimable. Cette hétérogénéité écosystémique se reflète dans la grande diversité géomorphologique (vallées, plaines, marécages, lacs, dunes, collines etc.), édaphique (sols argileux, sableux, halomorphes, calcaire et sols tourbeux) et climatique (l'imbrication de divers étages bioclimatiques de la végétation, de l'humide, le subhumide). Les rapports entre la végétation et le sol occupent une place particulièrement importante en écologie. Afin de mettre en évidence les relations multiples entre les filières agricoles et forestières.

Le choix de la partie Nord-Est de l'Algérie notamment de la wilaya d'El Tarf et la wilaya d'Annaba, comme zone d'étude selon plusieurs critères qui donnent une position singulière en Algérie, ces critères sont comme suit :

La zone d'étude se distingue par ses milieux physiques et naturels très diversifiés.

La zone d'étude se distingue par un couvert végétal varié : les forêts denses et claires, les maquis puis la végétation spontanée.

La pression anthropique qui touche la région l'étude comme : le surpâturage, les feux de forêts, la pollution, les infrastructures.

Nous avons adopté une démarche consistant à sélectionner des zones aux vocations différents, incluant (terrain cultivé, terrain non cultivé, de pâture, agroforestier, terrain urbains). Dans chaque zone nous avons prélevées le sol à deux niveaux : de 0 à 5cm à l'aide de cylindres et un autre de 0 à 30 cm.

Le nombre de site étudiés par zone varie en fonction de la configuration du terrain, les modes de gestion, types de végétation et des formes d'usage des écosystèmes. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisis la wilaya d'El Tarf en fonctions des caractéristiques de la région d'étude. Ces stations d'étude sont considérées comme étant les plus touchée par les activités humaines dans la mesure où elles connaissent une forte croissance de population ce qui entraîne a augmenté les besoins en commodités telles que (la construction de l'infrastructure, logement),

et le développement des activités industrielles, agricole ou autres. Selon (Aouissi et al.,2021 ; Benlakhlef, 2008), la région d'Annaba a connu une expansion importante au fil du temps en termes de construction qui occupe les espaces verts, la réduction de la nature dans les stations environnement afin de créer les maisons, les entreprises et autres structures, principalement à des fins économiques.

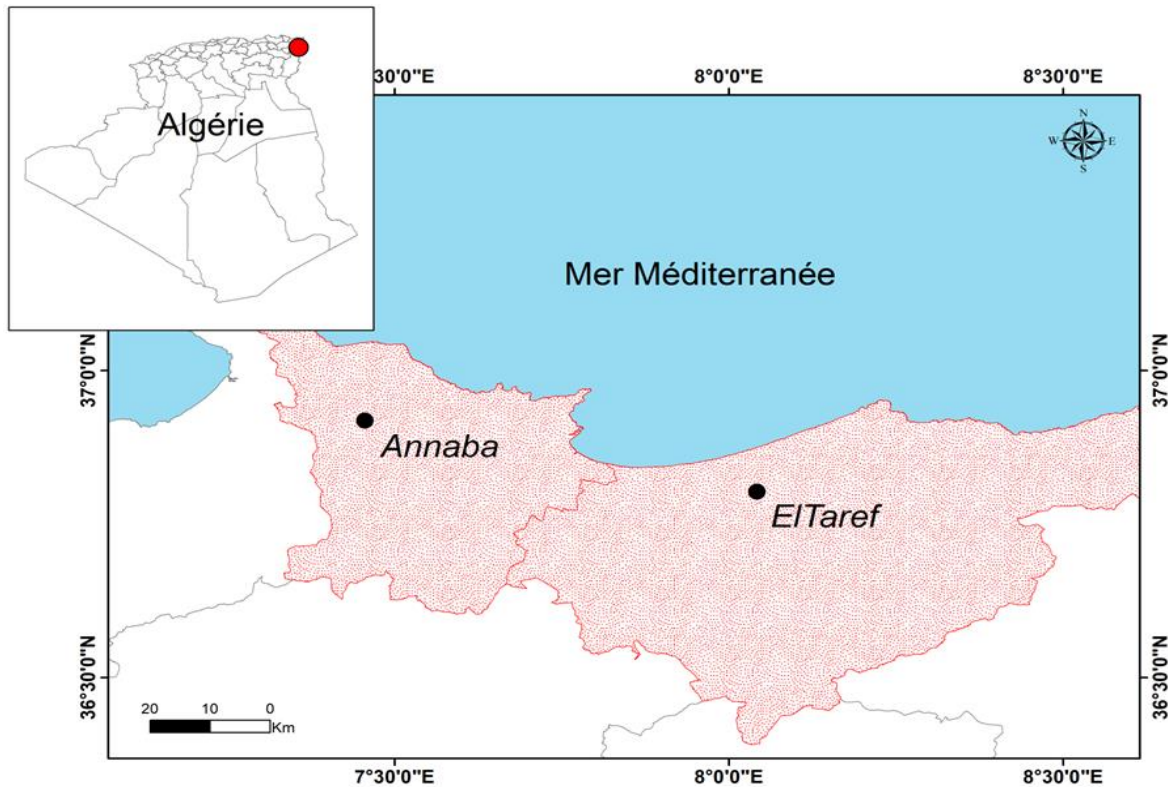


Figure 03 : Carte de la situation géographique de la région d'étude. © (Dahmani C., 2021).

2.1. Situation géographique de la région d'étude :

La zone d'étude est localisée à l'extrême nord-est de l'Algérie, entre 36°30' et 37°30' de latitude Nord et 7°20' et 8°40' de longitude Est. Elle est limitée au nord par la mer Méditerranée, à l'est par la frontière algéro-tunisienne, au sud par les monts d'Aïn Berda et de la Medjerda, et à l'ouest par le Guerbès senhadja. Cette configuration géographique confère à la zone d'étude une position stratégique marquée par une grande diversité de paysages et d'écosystèmes, allant des milieux littoraux et humides aux zones forestières et agricoles. Elle abrite les plus vastes zones humides de l'Afrique du Nord. Comprenant de nombreux sites classés Ramsar d'importance internationale. Parmi eux, le Lac Tonga constitue un excellent

exemple de zone humide représentative, rare et exceptionnelle constitue, tandis que le Lac Fetzara de grande valeur écologique (Allaoua, 2019).

Cependant, certaines de ces zones se trouvent près de régions urbaines et industrielles, ce qui les expose à des interventions humaines qui risquent de les dégrader. La variété et la richesse de son sol lui donnent une double vocation agricole et touristique et industrielle très importante. De plus, elle partage une bande de 100 km de long avec la république de Tunisie. D'un point de vue géographique, cette zone côtière fait partie entièrement du large domaine méditerranéen, ce qui définit son climat, sa topographie et sa végétation (Attoui, 2009) (Figure 04).

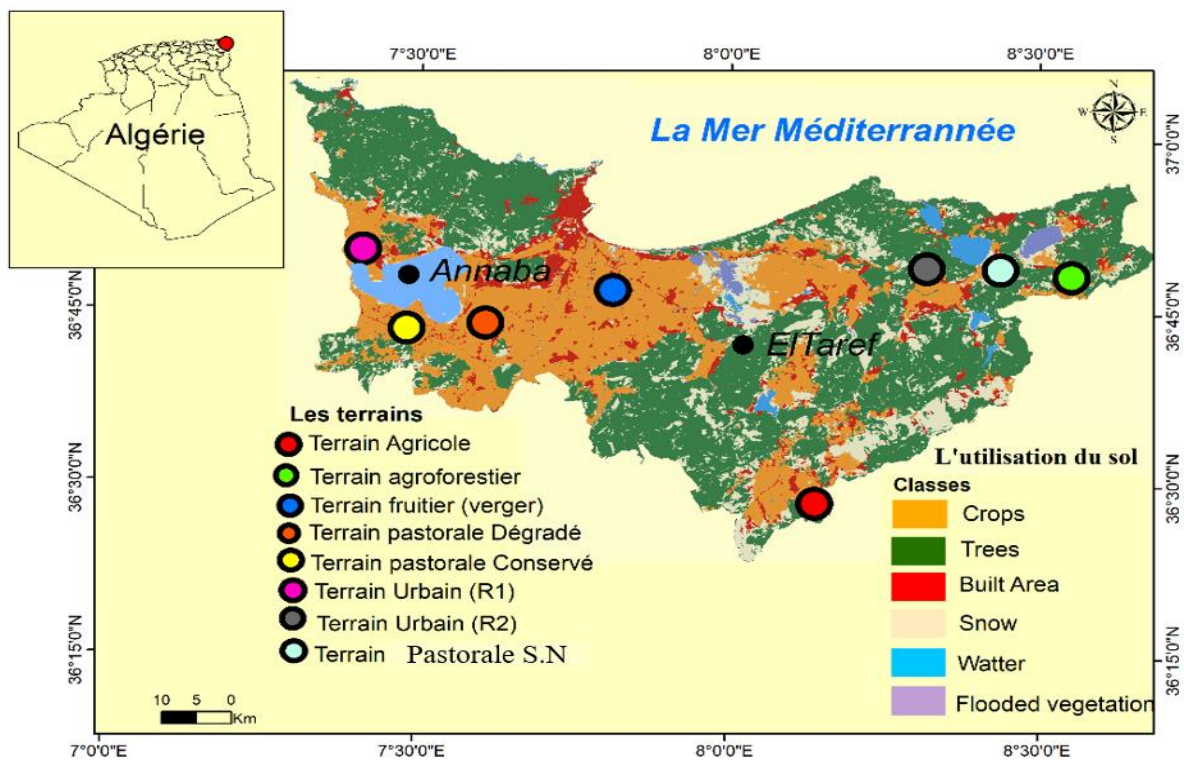


Figure 04 : Région d'étude et zones d'échantillonnage selon les modes d'occupation des sols.

© (Dahmani C., 2021).

2.2.1. La zone des plaines :

Le paysage de la région d'étude est principalement composé de plaines et de piémonts, de dunes côtières ainsi que d'étendues lacustres et marécageuses. Cette région couvre environ 1259 km², soit 43 % du territoire, et abrite environ 68 % de la population. Elle comprend cinq zones d'expansion touristiques, un littoral de 100 km de long et plusieurs lacs, notamment (Lac des Oiseaux, le Lac Mellah, le Lac Oubeira, le Lac Tonga et le Lac Fetzara) (Joleaud, 1936).

Par ailleurs, environ 25,82 % de sa superficie est utilisée à des fins agricoles, principalement pour la céréaliculture et l'arboriculture, en raison de la fertilité des sols (Halassi, 2018).

2.2.2. La zone de montagne :

Elle est composée d'un massif collinaire et montagneux ainsi que d'une forêt très dense. La wilaya d'El Tarf couvre une superficie de 1632 km², soit 57 % du territoire, et abrite environ 32 % de la population. Le territoire forestier actuel s'étend sur environ 167 687 hectares et présente un relief très accidenté (Bouazouni, 2004). Concernant la wilaya d'Annaba, Halassi (2018) indique qu'elle couvre 52 % du territoire et se caractérise par le massif de l'Edough, dont le sommet le plus élevé, le mont Bouzizi, atteint 1008 mètres d'altitude. Sa superficie est principalement couverte de forêts, ce qui en fait une région favorable à l'élevage du bétail.

2.2.3. Milieu agricole :

La région d'étude est caractérisée par une forte activité agricole et industrielle. L'agriculture est présente dans l'ensemble de la plaine, avec une grande diversité de cultures céréalières, maraîchères et arboricoles. L'activité industrielle se distingue dans la région, l'environnement de la région d'Annaba est fortement dégradé en raison d'un développement urbain anarchique et d'une industrie particulièrement polluante (Boubekeur, 2021).

La wilaya d'El Tarf dispose seulement 24 % de superficie agricole utile, principalement localisée dans le périmètre irrigué de la Bounamoussa ainsi que dans les plaines de Bouteldja et d'El Tarf. Cette situation est due d'une part par le relief accidenté au sud de la wilaya, et d'autre part par l'importance des superficies forestières, qui s'élève à environ 166 311 hectares, avec une longue tradition agricole, El Tarf maintient encore un réseau d'exploitation très développé, principalement composé de cultures herbacées.

Les surfaces qui ne sont pas encore exploitées méritent des investissements pour développer, notamment pour la viticulture, qui ne représente que 1,66 % de la surface agricole utile, ainsi

que pour l'arboriculture qui ne représente que 8,13 % de la surface agricole utile, la culture industrielle de la tomate, l'arachide.

Les principaux secteurs économiques présentant un potentiel de développement sont les cultures fruitières, les cultures maraîchères, la céréaliculture ainsi que les activités industrielles et de services (Bouazouni, 2004).

2.2.4. Géologie :

D'après Mezbour (2018), la zone d'Annaba-El Tarf présente une grande diversité de formations géologiques. Selon Joleaud (1936), durant l'Éocène, les massifs de bordure des régions d'Annaba et d'El Hadjar étaient constitués de gneiss, schistes, micaschistes et cipolins. Les grès et argiles de la Numidie sont largement représentés dans les massifs périphériques notamment à Drean, Zerizer, Ben M'hidi, Bouteldja et El Kala, ainsi que dans les collines et leurs piémonts, datant de l'Éocène et de l'Oligocène. Les grès numidiens, souvent associés aux argiles, forment le flysch de la Numidie (Joleaud, 1912).

À l'ouest de la plaine d'Annaba, se trouve le massif cristallin de l'Edough, composé de formations métamorphiques, qui s'étendent vers le massif de Bouhamra jusqu'au cap de Garde (Belouahem, 2012 ; Halassi, 2018). Entre ces reliefs apparaissent des bassins de sédimentation et des dépressions, telles que celle de Kherraza-Fetzara.

Plus récemment, les régosols des dunes remontent au Quaternaire (Joleaud, 1936), tandis que des alluvions et colluvions se sont déposés en périphérie et à l'intérieur des cuvettes et terrasses, façonnées durant le Pléistocène moyen et récent. Les bas-fonds marécageux et lacustres renferment des dépôts limono- argilo-sableux attribués au Rharbien (Néolithique récent). Enfin, des affleurements marneux datant de l'Oligocène sont localisés à proximité de la frontière algéro - tunisienne (Joleaud, 1936).

2.2.5. Hydrographie :

Les principaux éléments physiques qui définissent les attributs du réseau hydrographique sont la géomorphologie, la composition géologique du sol, le climat et la végétation.

La zone d'étude abrite un réseau de plans d'eau, allant des marécages aux lacs en passant par les marais. Parmi ceux-ci, on distingue notamment : le marécage de la Mekhadda, les lacs Tonga, Noir, Oubeira, Mellah, Bleu et Fetzara, ainsi que les marais de Bourdim et le Boussadra (Joleaud, 1936). Les oueds structurent également ce paysage : au sud, on observe de vastes

collecteurs tels que l'Oued El- kébir et ses affluents (Oued Bougous, Oued Mellila), tandis qu'à l'ouest et à l'est, des cours d'eau alimentent les plaines et les lacs (Benyacoub et al., 1998).

Dans l'ensemble, ce réseau hydrographique confère à la région littorale Annaba-El Tarf une importance écologique et hydrologique majeure, tout en étant exposé aux pressions anthropiques. Globalement, le réseau hydrographique confère à la zone côtière Annaba-El Tarf une signification écologique et hydrologique considérable, tout en restant soumis aux pressions d'origine humaine.

2.2.6. Pédologie :

Selon (Tabet, 2008) la répartition des sols présente une zonation en relation avec le climat. Toutefois, cette distribution est fortement modifiée par la nature des roches mères, le relief, l'eau, la végétation, ainsi que les facteurs biotiques et anthropiques.

Dans les bioclimats humides et subhumides, on observe principalement des sols bruns lessivés et des sols bruns calcaires. Dans les bioclimats semi-arides et arides, on rencontre souvent des sols châtains et des sols bruns iso humiques avec des accumulations calcaires en profondeur, ainsi que des sols gris subdésertiques, des sols minéraux bruts d'érosion ou d'apport, et des sols salins dans les zones arides et désertiques (Duchauffour, 1977). Selon la classification internationale des sols, la World Reference Base for Soil Resources (WRB, FAO, 2015).

Les types de sol prédominants dans la région d'étude sont les Luvisols (LV), les Fluvisols (FL) et les Calcisols (CL). Ces sols sont influencés par les conditions environnementales locales, y compris la disponibilité de MOS et la nature du matériau parental, ils se caractérisent par des couleurs variant du brun au noir.

2.3. Caractérisations climatiques :

D'après (Boubekeur, 2021) le climat joue un rôle essentiel dans l'analyse du milieu, car il est à l'origine de la répartition des plantes et des animaux. Il constitue un élément essentiel pour la valorisation des milieux naturels et nécessite une analyse approfondie de ses différentes composantes.

Selon Tabet (2008) le climat de l'Algérie est de type méditerranéen, extra - tropical tempéré, avec une sécheresse estivale prolongée (3 à 4 mois sur le littoral, 5 à 6 mois dans les Hautes plaines et plus de 6 mois dans l'Atlas Saharien). Cette situation est principalement due à l'interaction de trois facteurs : la mer, le relief et l'altitude combinés.

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par deux saisons :

- Un hiver doux et humide, s'étendant les moins de septembre à mai.
- Un été chaud et sec durant les moins de juin à août.

Sur le plan bioclimatique, la région se rattache majoritairement à l'étage subhumide avec des nuances locales allant de l'humide chaud en zone littorale au subhumide doux à frais dans les secteurs de l'intérieur et des reliefs.

Au Nord, le climat de la wilaya d'El Tarf est subhumide et humide chaud, tandis qu'au sud, il devient humide doux à humide frais. La pluviométrie annuelle varie entre 900 et 1200 mm.

Le régime pluviométrique est marqué par des précipitations abondantes en hiver qui deviennent presque constantes au printemps et atteignent quelques millimètres par mois pendant l'été.

La répartition des pluies présente une disparité régionale. La zone orientale (El-kala et Ain El Assel) est plus humide et pluvieuse que la zone occidentale. La pluviométrie moyenne s'élève à 800 mm et 700 mm respectivement. En moyenne, la température varie de 12°C pendant l'hiver jusqu'à 28 °C pendant l'été (juillet-août).

Le climat de la wilaya d'Annaba, de type méditerranéen et appartenant à l'étage bioclimatique subhumide (Boughediri et Benslama, 2020), est caractérisé par deux saisons contrastées : une période estivale, chaude et sèche, qui s'étend de juin à août, et une période hivernale, douce et humide, relativement longue, allant de septembre à mai (Mellouk, 2021).

2.3.1. Pluviométrie :

Les précipitations constituent un élément écologique essentiel, leur répartition annuelle revêt une grande importance en raison de leur rythme et de leur valeur volumique absolue (Dajoz, 1974).

La partie orientale de l'Algérie est la plus arrosée, avec des pluviométries maximales plus élevées au niveau des massifs montagneux les plus proches de la mer. Le tableau 01 présente les moyennes mensuelles des précipitations entre 2017 et 2021.

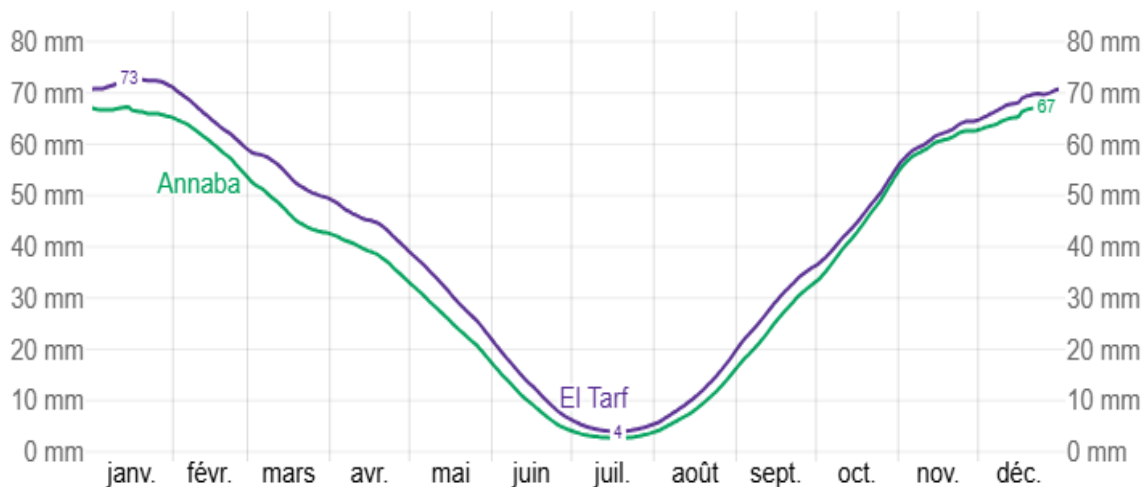


Figure 05 : Moyenne mensuelle des précipitations relevées dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).

Tableau 01 : Moyenne mensuelle des précipitations relevées dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).

Pluie	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
El Tarf	<u>72,5mm</u>	65,3mm	53,9mm	45,2mm	30,8mm	13,2mm	<u>4,0mm</u>	10,7mm	29,1mm	44,8mm	61,7mm	68,2mm
Annaba	<u>66,6mm</u>	60,8mm	46,5mm	39,2mm	25,4mm	9,6mm	<u>2,7mm</u>	8,2mm	25,2mm	42,8mm	60,4mm	65,5mm

Selon le tableau 01 le régime pluviométrique est typiquement méditerranéen : saison humide de septembre à avril avec bilan hydrique positif et saison sèche de mai à août avec bilan hydrique négatif. Par conséquent, les précipitations maximales sont enregistrées en janvier avec 72,5 - 66,6 mm et les précipitations minimales en juillet.

2.3.2. La température :

La température est l'un des éléments clés qui ont un impact direct sur la diversité des espèces faunistiques et floristiques et la qualité de sols. L'altitude et la distance par rapport à la position topographique déterminent ce paramètre (Ozenda, 1982).

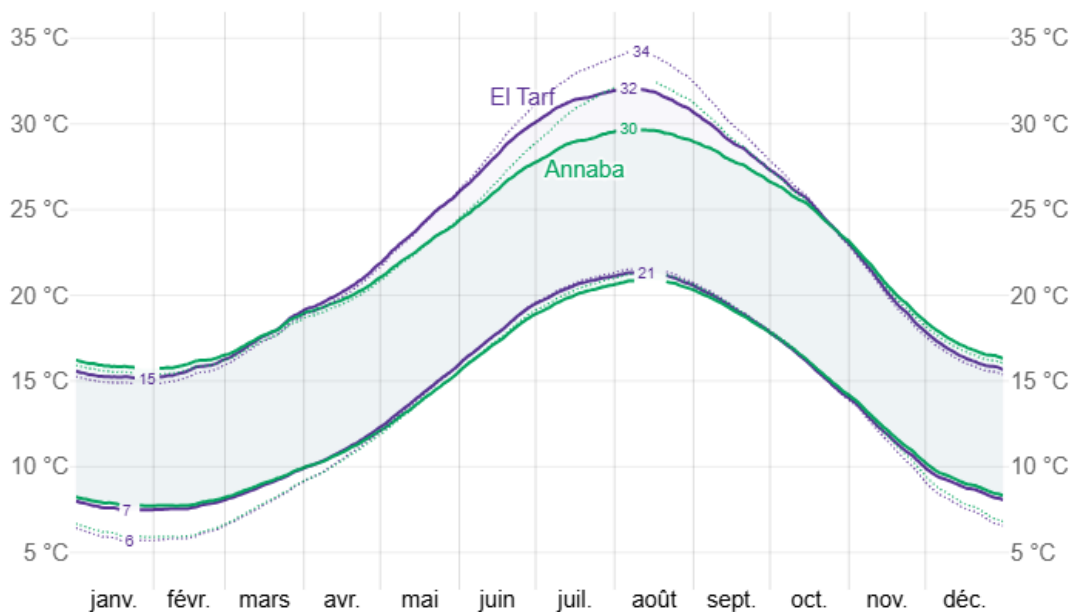


Figure 06 : Moyenne mensuelle des températures relevée dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).

Tableau 02 : Moyenne mensuelle des températures relevée dans la région d'étude entre 2017 et 2021. (Weatherspark, 2021).

Hautes	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
El Tarf	15 °C	16 °C	18 °C	20 °C	24 °C	28 °C	31 °C	32 °C	29 °C	25 °C	20 °C	16 °C
Annaba	16 °C	16 °C	18 °C	20 °C	23 °C	26 °C	29 °C	29 °C	28 °C	25 °C	21 °C	17 °C
Basses	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
El Tarf	8 °C	8 °C	9 °C	11 °C	14 °C	18 °C	21 °C	21 °C	19 °C	16 °C	12 °C	9 °C
Annaba	8 °C	8 °C	9 °C	11 °C	14 °C	17 °C	20 °C	21 °C	19 °C	16 °C	12 °C	9 °C

D'après les données de la station météo, janvier et février sont généralement les mois les plus froids, tandis que juillet et août enregistrent les températures les plus élevées.

2.3.3. Humidité :

L'humidité relative de l'air, également connue sous le nom de degré hygrométrique, correspond à la proportion d'eau sous forme de vapeur présente dans l'air par rapport à sa capacité à en retenir. La zone d'étude est considérée comme l'une des plus humides de l'Afrique du Nord. Son emplacement côtier, mais aussi la présence de nombreuses zones humides et de nouveaux barrages, provoquent une forte évaporation causée par un fort ensoleillement.

Dans la wilaya d'El Tarf l'humidité relative de l'air varie donc de 73,1 % et plus de 80,4 % tout au long de l'année, en particulier pendant l'hiver et le printemps, période où les brouillards matinaux sont fréquents et les rosées matinales presque quotidiennes.

Pour la wilaya de Annaba l'humidité est élevée à la fois pendant l'hiver et pendant l'été, avec une moyenne maximale de 93 % en décembre et une moyenne minimale de 46 % en juillet (Chettibi, 2013).

2.4. Les indices climatiques :

2.4.1. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN :

Cet indicateur climatique permet de faire une comparaison mensuelle de la température et de la pluviosité. Les données sont sélectionnées de manière à ce que 10°C correspond à 20 mm de pluie.

Selon le diagramme ombrothermique de la région d'étude pour la période 1988-2018, il y a deux périodes distinctes : une période sèche qui s'étend de mai à août et une période humide qui s'étend de septembre à avril environ.

Le diagramme est une représentation graphique des périodes sèches et humides de l'année, avec les mois en abscisses et les précipitations (P) et les températures (T) en ordonnées. selon Charre (1997) $P=2T$.

En se basant sur le diagramme pluviothermique de Gausсен, on peut constater que l'année est divisée en une saison sèche du début du mois d'avril à la mi-septembre et une saison humide le reste de l'année, janvier le plus froid et août le plus chaud (Chettib, 2020).

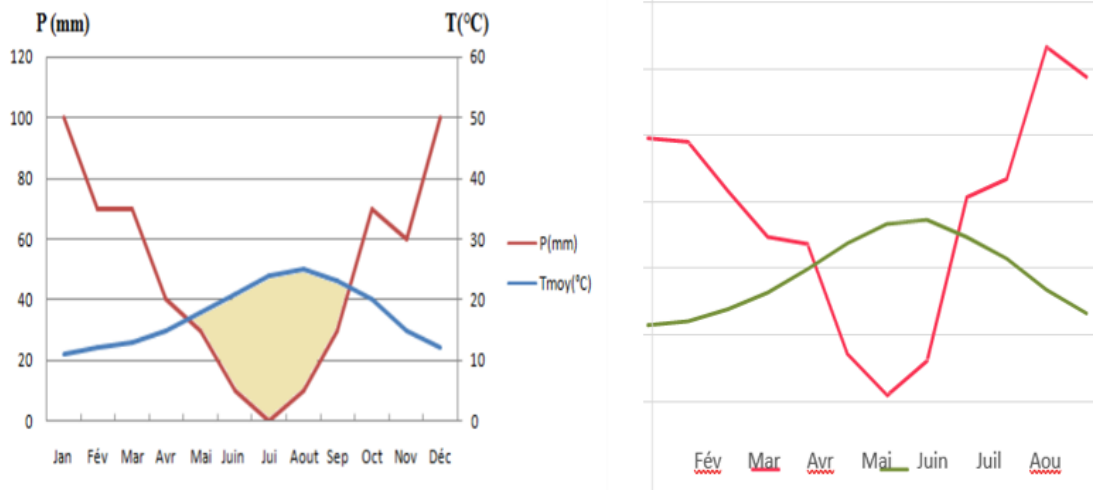


Figure 07 : Diagramme ombrothermique de la région d'étude pour la période (1988-2018).
(Chettibi,2020 ; Halassi, 2018).

2.4.2. Le quotient pluviothermique d'emberger :

Cet indice, initialement établi pour les régions méditerranéennes, tient compte du fait que l'évaporation annuelle est d'autant plus importante, toutes choses égales par ailleurs, que l'amplitude thermique est plus élevée Ramade (2008).

Si M représente la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud de l'année, m représente les températures minimales du mois le plus froid (exprimées en degrés K).

Si P correspond aux précipitations annuelles en mm, le quotient pluviothermique d'Emberger se présente sous la forme suivante :

$$Q2 = \frac{P \times 1000}{(M + m) \times (M - m) / 2}$$

Les résultats de l'application de la formule en fonction des valeurs thermique et pluviométrique de la station sont signalés dans la figure 08.

En comparant ces valeurs dans le climagramme d'Emberger avec le quotient (Q) (sur l'axe des ordonnées) et le facteur (m) (en abscisses), on peut constater que la région d'étude se trouve dans l'étage bioclimatique méditerranéen subhumide à hiver doux (Chettib, 2020 ; Halassi, 2018).

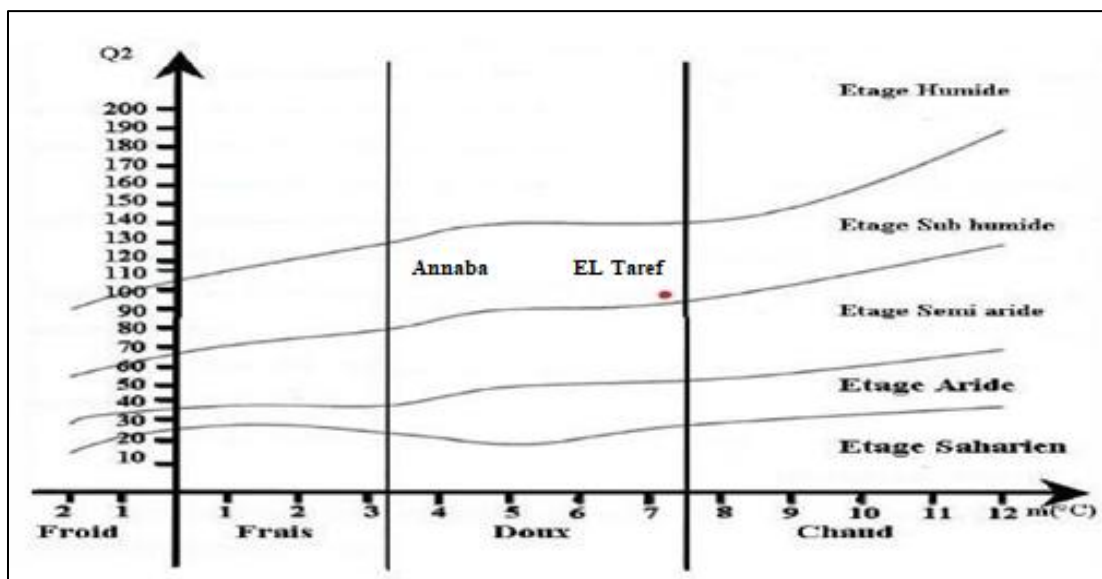


Figure 08 : Etage bioclimatique de la région d'étude selon le climagramme d'EMBERGER.

2.4.3. Milieu forestier :

Une couverture forestière couvre plus de la moitié de la surface de la wilaya d'el Tarf, la superficie des forêts s'élève à 165 000 hectares, ce qui représente 57% de la surface. Selon Bouzid (2018) Annaba avec une superficie de 68 824 hectares et un taux de boisement de 48,74 %, Ces forêts se situent en grande partie sur la bande frontalière qui s'étend d'Oum Teboul jusqu'à Bouhadjar. La deuxième partie se trouve à l'intérieur de la wilaya dans les plaines d'Annaba et d'El Tarf. Principalement composées de chêne-liège, de chêne zeen et le chêne kermès, ainsi que par des formations de maquis à lentisque et à myrte (Boughediri et Benslama.,2020). D'autres essences sont également présentes, comme les oléastres, les frênes, ainsi que diverses formations d'aulne glutineux, également appelées « les aulnaies », qui sont très appréciées pour leur valeur écologique (Belouahem-Abed et al., 2011).

2.4.4. Caractéristiques des stations d'étude :

- **Occupation des sols (A) :** Terrain agricole.
- **Le type du sol :** sol brun, structure grumeleuse en surface et massive en profondeur, texture argileuse.
- **Coordonnées géographiques :** latitude N 36°46'10'', longitude E 8°17'56''.
- **Végétation :** résidus de cultures céréalières (blé), recouvrement de 30 %. Présence de *Phalaris sp.* (Poaceae).
- **L'activité biologique :** moyenne.

- **Taux de recouvrement** :30 % des résidus des végétaux, faible densité racinaire en surface et en profondeur.
 - **Ombrage** :10%.
 - **Substrat** : Caillaux 30%, galets, 20%.
 - **Pression anthropique** : Pâturage, surexploitation des ressources naturelles.
-
- **Occupation des sols (B)** : Terrain agroforesterie.
 - **Le type du sol** : le sol brun a noir, rouge brun dans quelques profile.
ce qui indique la présence d'oxyde de fer, les teneurs en MO sont importantes, structure perméable, Le pH est neutre.
 - **Coordonnées géographiques** : latitude N 36°48'34'', longitude E 8°32'26''.
 - **Type de végétation** : cultures de blé associées à des oliviers.
occupant une place centrale dans le système, présence de la végétations spontanées.
 - **L'activité biologique** : forte.
 - **Taux de recouvrement** :70% des résidus des végétaux.
Avec une densité racinaire important en surface et en profondeurs.
 - **Ombrage** : 80%.
 - **Pression anthropique** : l'expansion des zones urbaines qui peut entrainer la conversion des terrains.
-
- **Occupation des sols (C)** : verger.
 - **Le type du sol** : sol brun, teneur moyenne en MO, structure grumeleuse, la texture varie entre limoneuse et limono-sableuse.
 - **Coordonnées géographiques** : latitude N 7°81'85'', longitude E 36°77'70''.
 - **Type de végétation** : vergers de citronniers.
 - **Taux de recouvrement** :50 % des résidus des végétaux, une densité racinaire moyenne en surface et en profondeurs.
 - **Ombrage** :50%
 - **L'activité biologique** : moyenne
 - **Substrat** : Caillaux 30%, galets 30%
 - **Pression anthropique** : l'utilisation des pesticides, surexploitation des ressources naturelles.

- **Occupation des sols (D) :** Terrain pastorale semi-naturelle.
 - **Le type du sol :** sol brun, teneur moyenne en MOS, structure grumeleuse. texture variable, de limoneuse à limono-sableuse.
 - **Coordonnées géographiques :** latitude N 8°29'57'', longitude E 36°49'23''.
 - **Type de végétation :** végétation spontanée.
 - **L'activité biologique :** moyenne.
 - **Taux de recouvrement :** 50% des résidus des végétaux, une densité racinaire moyenne en surface et en profondeurs.
 - **Ombre :** 30%.
 - **Substrat :** Cailloux 30%, galets 30%.
 - **Pression anthropique :** pâturage.
-
- **Occupation des sols (E) :** Terrain urbain.
 - **Type du sol :** sol brun, structure compacte, texture limono-sableuse, faible teneur en MO, forte concentration en calcaire, pH alcalin.
 - **Coordonnées géographiques :** latitude N 36°44'53'', longitude E 8°17'56''.
 - **Végétation :** végétation spontanée.
 - **L'activité biologique :** faible, avec une densité racinaire réduite en surface et en profondeur.
 - **Taux de recouvrement :** environ 30 %
 - **Ombre :** environ 30 %.
 - **Substrat :** 50 % cailloux, 50 % galets.
 - **Pression anthropique :** pâturage, fragmentation des espaces verts et construction d'infrastructures.
-
- **Occupation des sols (F) :** terrain pastoral conservé.
 - **Type de sol :** couleur noire, riche MO grâce à la densité de la couverture végétale. Texture argilo-limoneuse, sols dépourvus de calcaire, pH neutre à moyennement alcalin.
 - **Coordonnées géographiques :** latitude N 36°81', longitude E 7°35'5''.
 - **Végétation :** herbacées diversifiées.
 - **Activité biologique :** forte, avec une densité racinaire élevée en surface et en profondeur.
 - **Taux de recouvrement :** environ 90 % par les résidus végétaux.

- **Ombfrage** : environ 50 %.
 - **Substrat** : 30 % cailloux, 20 % galets.
 - **Pression anthropique** : pâturage, mais zone relativement protégée des pressions humaines excessives (surpâturage, exploitation intensive).
-
- **Occupation des sols (G)** : terrain urbain.
 - **Type de sol** : pauvre en MO, riche en calcaire, texture limono-sableuse, pH variable (acide à alcalin), présence possible de polluants et contaminants liés aux activités urbaines.
 - **Coordonnées géographiques** : latitude N 36°44'45'', longitude E 7°28'03''.
 - **Végétation** : essentiellement herbacées, issues d'espaces verts artificiels.
 - **Activité biologique** : faible.
 - **Taux de recouvrement** : environ 10 % de résidus végétaux, faible densité racinaire en surface comme en profondeur.
 - **Ombfrage** : 10 %.
 - **Substrat** : 70 % cailloux, 70 % galets.
 - **Pression anthropique** : forte (construction d'infrastructures, fragmentation et usage intensif des espaces verts).
-
- **Occupation des sols (H)** : terrain pastoral dégradé.
 - **Type de sol** : texture limono-sableuse, pauvre en MO.
 - **Coordonnées géographiques** : latitude N 36°44'45'', longitude E 7°28'03''.
 - **Végétation** : principalement herbacées.
 - **Activité biologique** : faible.
 - **Taux de recouvrement** : environ 10 % de résidus végétaux, faible densité racinaire en surface comme en profondeur.
 - **Ombfrage** : 10 %
 - **Substrat** : 40 % cailloux, 30 % galets.
 - **Pression anthropique** : pâturage intensif (surpâturage).

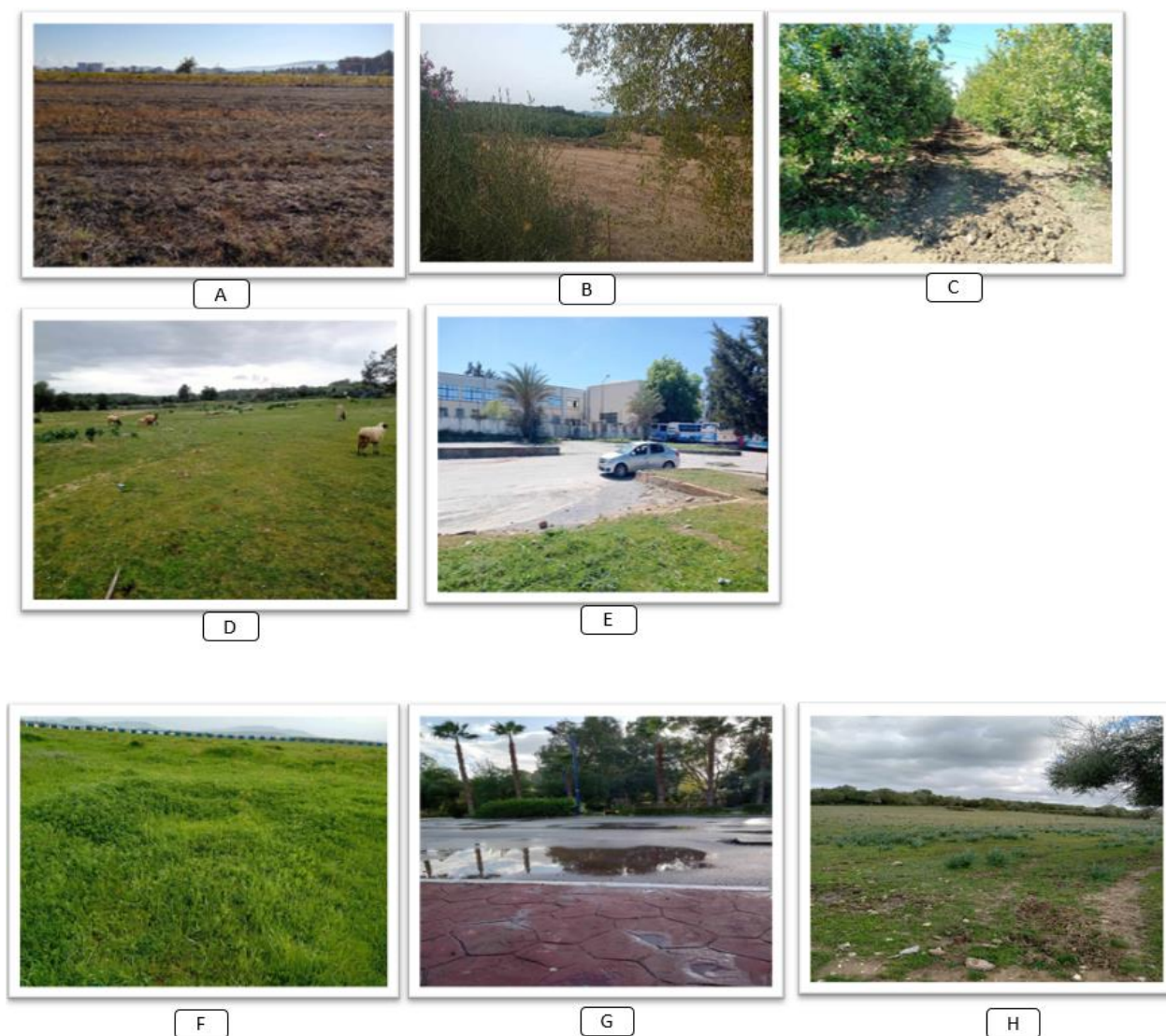


Figure 09 : Modes d'occupation des sols étudiés : A) terre agricole ; B) terre agroforesterie ; C) verger ; D) zone pastoral semi-naturelle ; E) terrain urbain ; F) zone pastorale conservé ; G) terrain urbain ; H) zone pastorale dégradée. © (Dahmani C., 2021).

Chapitre. III. Matériels et méthodes

Chapitre III : Matériels et méthodes :

Dans le présent chapitre, le protocole d'échantillonnage adopté pour la collecte des échantillons de sol sera détaillé, de même que les différentes méthodes d'analyses qui ont été appliquées, ainsi que les traitements statistiques appliquée pour l'interprétation des résultats.

3. Méthodes de prélèvement des échantillons :

Les échantillons de sol ont été prélevés à deux profondeurs : 0-5 cm et 0-30 cm. Le prélèvement de 0-5cm a été réalisée à l'aide des cylindres de 5 cm de hauteur et 5 cm de diamètre. Les cylindres ont été enfoncés verticalement dans le sol avec précaution afin d'éviter toute perturbation de la structure naturelles du sol autour ainsi que pour avoir des échantillons intacts de la zone d'étude, une fois prélevés, les échantillons ont été immédiatement scellés et étiquetés et conserver jusqu'au moment d'analyse.

Le deuxième niveau été obtenue par la réalisation d'une coupe du sol de 0-30cm, Cette méthode a permis de caractériser le profil pédologique à travers plusieurs paramètres, notamment : la couleur, la structure, la texture, la densité racinaire, l'activité biologique. Les échantillons ont été collectés à l'aide de palles, ensuite étiquetés est conserver dans des sachets, jusqu'à au moment d'analyses.

En principe, cette méthode de prélèvement à deux profondeurs permet d'obtenir des informations plus détaillées sur les propriétés des sols en fonction de la profondeur et des modes d'occupation des sols.

3.1. Matériels utilisés sur le terrain :

- Cylindres Numérotés : utilisés pour le prélèvement des échantillons de sol 0-5 cm.
- Marteau : utilisé pour enfoncer les cylindres dans le sol.
- GPS : utilisé pour enregistrer les coordonnées de chaque point de prélèvement.
- Appareil photos.
- Outil de creusement : utilisé pour creuser des trous autour des cylindres afin de faciliter le prélèvement.
- Pelle : utilisée pour réaliser les prélèvements de sol à la profondeur de 0–30 cm.
- Cahier de terrain : pour prendre des notes sur les caractérisations des stations d'étude, y compris la structure, la texture, l'activité biologique, la couleur, la couverture végétale.
- Sachets plastique : utilisé pour garder les échantillons des sols.



Figure 10 : Matériel utilisé sur le terrain. © (Dahmani C., 2021).



Figure 11 : Prélèvement des échantillons de sol sur le terrain. © (Dahmani C., 2021).

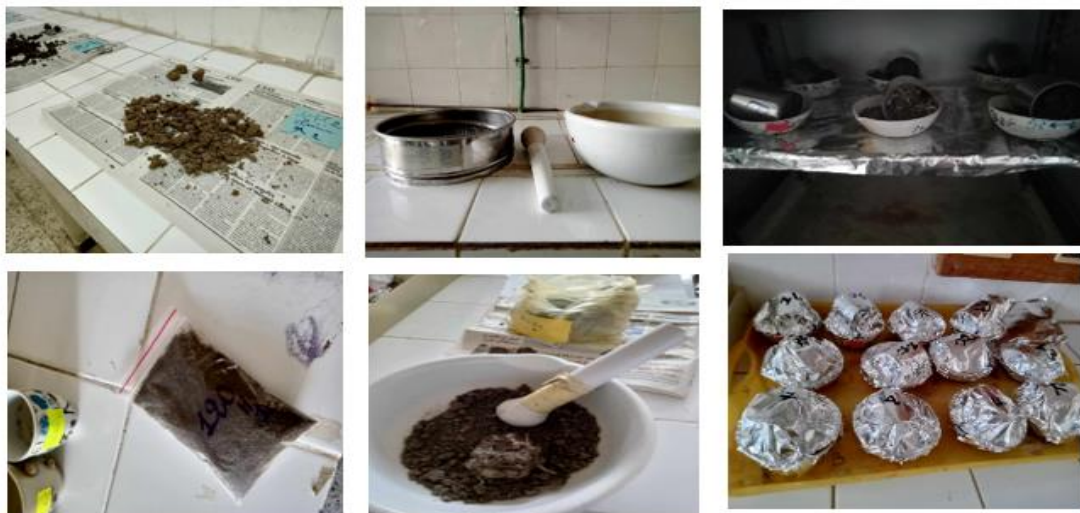


Figure 12 : Préparation des échantillons de sol. © (Dahmani C., 2021).

3.2. Préparation du sol :

Les étapes de travail au laboratoire ont été réalisées selon le protocole suivant :

Séchage des échantillons :

Échantillons de (0-30 cm) :

- Les échantillons de sol ont été transportés au laboratoire, séchés à l'air libre pendant quelques jours, broyés et tamisés à 2 mm afin d'obtenir une terre fine destinée aux différentes analyses physico-chimiques.

Échantillons de (0-5 cm) :

- Les échantillons des sols transportés dans des cylindres sont séchés à l'étuve pendant 24 h à 105°C.

Broyage et Tamisage :

- Utiliser un broyeur à mortier pour broyer les échantillons des sols puis tamiser le sol avec un tamis de 2 mm (séparer les éléments fins et les éléments grossières).

3.3. Les Analyses physico-chimiques effectuées :

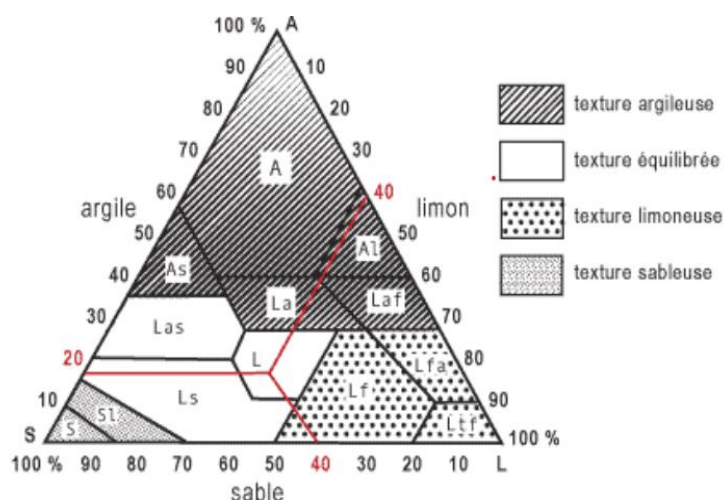
Les analyses physico-chimiques des sols ont été effectuées au sein du laboratoire de recherche « sol et Développement durable » de la Faculté des sciences de la Nature et de la vie de l'Université de Badji Mokhtar Annaba.

Les méthodes choisies ainsi que les protocoles appliqués sont les suivants :

3.3.1. La Granulométrie :

La granulométrie d'un sol consiste à déterminer la proportion des différentes classes de particules. Selon la classification de l'USDA (Figure 13), on distingue : les sables (0,05–2 mm), les limons (0,002–0,05 mm) et les argiles (<0,002 mm) (Bonneau et Souchier, 1994).

La méthode utilisée est celle de la pipette de Robinson, qui permet de déterminer certaines caractéristiques du sol, telles que la capacité des racines à y pénétrer, la capacité du sol à retenir l'eau et la sensibilité à la compaction (Damay et Julien, 1995 ; Boumaraf, 2009).



La Légende :

A : argileux	L : Limoneux
As : argilo-sableux	Ls : Limono-sableux
Al : argilo-limoneux	Lfa : Limoneux fins argileuses
La : limono-argileux	Lf : limoneux fins
Laf : limono-argileux fins	Ltf : limoneux très fins
Las : Limono-argileux sableux	Sl : sablo-limoneux
S : sableux	

Figure 13 : Classe de la texture du sol (USDA par triangle de texture).

3.3.2. Le pH :

D'après (Habtamu et al.,2008), Le pH du sol est souvent considéré comme une "variable majeure" car il régule presque toutes les réactions biologiques et chimiques dans le sol. Selon Brady et Weil (1996), il s'agit d'une mesure de la concentration en ions hydrogène permettent d'évaluer l'acidité ou la basicité d'un milieu.

Le pH du sol est principalement lié à la nature du matériau parent, le climat, la teneur en matière organique et la position topographique. La mesure du pH eau est utilisé pour évaluer l'acidité d'une suspension de sol dans l'eau, selon un rapport sol/eau normalisé (1/5).

Le pH_{KCl} représente un indicateur du degré de saturation du complexe adsorbant.

Les mesures ont été réalisées à température ambiante, sous agitation, puis après stabilisation de la lecture, selon la méthode classique à l'aide d'un pH mètre. L'appareil a été préalablement étalonné avec des solutions tampons (pH 4 et 7).

Tableau 03 : Les niveaux de classification de l'acidité du sol selon la classification USDA. (1971).

x	<4,5	Extrêmement acide
4,5	5	Très fortement acide
5,1	5,5	Fortement acide
5,6	6	Acide moyen
6,1	6,5	Légèrement acide
6,6	7,3	Neutre
7,4	7,8	Moyennement basique
7,9	8,4	Basique
8,5	9	Légèrement alcaline
9,1	10	Alcaline
x	> 10,0	Fortement alcaline

3.3.3. La Conductivité électrique (CE) :

D'après Rhoades (1996), la CE est mesurée de la même manière que le pH eau, mais à l'aide d'un conductimètre. L'échantillon de sol est préparé en suspension avec de l'eau distillée dans un rapport sol/eau de 1 :5 (w/v). L'appareil est préalablement calibré, puis la cellule de conductivité est introduite dans la suspension de sol, en veillant à ce que les électrodes soient complètement immergées. Les mesures sont effectuées à température ambiante, après stabilisation de la lecture.

Tableau 04 : Classification de l'acidité du sol (Boubehziz, 2021).

Niveau de salinité du sol	Electro-conductivité de l'extrait saturé en soi E _{Ce} à t= 25 °C (ds/m)
Non saline	<2
Très légèrement saline	2<4
Légèrement saline	4<8
Modérément saline	8<16
Fortement saline	≥16



Figure 14 : Instrument utiliser : pH mètre et conductimètre (Hanna Instrument, The Netherlands). © (Dahmani C., 2021).

3.3.4. L'humidité hygroscopique :

Selon Delcour (1981), l'humidité hygroscopique désigne la quantité d'eau que le sol peut conserver après son exposition aux conditions naturelles de l'air libre.

Afin d'évaluer la concentration d'humidité hygroscopique, le sol a été séché à l'extérieur puis dans une étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures.

Le poids avant et après séchage est le résultat de la variation de l'humidité de l'échantillon, une balance de précision a été utilisée pour mesurer le poids frais (PF) et le poids sec (PS).

La formule qui calcule l'humidité du sol est la suivante :

$$H (\%) = [(PF - PS) / PS] \times 100$$



Figure 15 : Matériel utilisé pour la détermination de l'humidité hygroscopique du sol. © Dahmani C. (2021).

3.3.5. Le Calcaire total :

Le carbonate de calcium (CaCO_3) contenu dans l'échantillon de sol avec une quantité surabondante d'acide chlorhydrique (HCl). Une fois le carbonate entièrement dissous après un durée de réaction, l'excédent d'acide non utilisé est neutralisé par une solution de (NaOH), en utilisant la phénolphtaléine comme indicateur coloré. La quantité de NaOH utilisée permet de déterminer la quantité d'acide qui a interagi avec le carbonate, ce qui permet d'évaluer la concentration en carbonate de calcium (Mathieu, 2003).



Figure 16 : Détermination du calcaire total © (Dahmani C., 2021).

Tableau 05 : Échelle d'interprétation de la teneur en carbonates de calcium (CaCO_3) dans le sol (Merabtene, 2021).

%CaCO_3	Charge en calcaire
< 1%	Sol non calcaire
1 - 5%	Sol peu calcaire
5 - 25%	Sol modérément calcaire
25 - 50%	Sol fortement calcaire
50 - 80%	Sol très fortement calcaire
> 80%	Sol excessivement calcaire

3.3.6. La teneur en carbone organique (CO) :

Selon le protocole Anne (teneur en carbone organiques) :

Le carbone organique est oxydé par une solution de bichromate de potassium en présence d'acide sulfurique, suivi d'un titrage du bichromate restant avec une solution de sel de Mohr Bonneau et Souchier (1994).

3.3.7. La teneur en matière organique (MO) :

Ceci se fait en brûlant le sol après l'avoir passé dans un four à moufle à 480°C pendant 24 heures exprimé en pourcentage du poids sec du sol (Morel, 1986).

Selon Lambert (1975), l'abondance de MO peut être classée en quatre classes, qui sont résumées dans le tableau suivant : (Tableau 06).

Tableau 06 : Classes d'abondance de la matière organique (Lambert, 1975).

Classes	Taux de matière organique	Qualification
1	<1	Très pauvre
2	1 à 2	Pauvre
3	2 à 4	Moyenne
4	>4	Riche

3.3.8. La Densité apparente :

La densité apparente du sol est un aspect fondamental, influençant notamment le développement des racines, l'aération, l'infiltration de l'eau et la croissance des plantes. Elle est essentielle pour déterminer les stocks organiques et d'éléments nutritifs minéraux (Prakach et Shimrah, 2023 ; Regasa, 2023). Ainsi que c un indicateur important à la compaction du sol. Prakach et Shimrah (2023).

Selon Black et Hartage (1986) et Bounoura (2018), la densité apparente (D_a) du sol est la mesure de la masse du sol par rapport à son volume apparent exprimé en Mg/m^3 . Elle a été calculée pour les échantillons de sol prélevés à l'aide d'un cylindre métallique.

Le poids humide du volume de sol contenu dans le cylindre a été pris in-situ à l'aide d'une balance. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve à 105 °C jusqu'à obtention d'une masse constante, permettant de déterminer la masse sèche du volume de sol.

On calcule la densité apparente en utilisant le rapport entre le poids sec (p) du sol dans le cylindre représenté en g et le volume du cylindre. $DA = P/V$.

3.3.9. Les stocks du carbone organique :

Le stock organique a été estimé pour chaque mode d'occupation du sol, se basant sur la teneur en CO (%), la densité apparente et l'épaisseur de la couche. La formule utilisée est celle proposée par Pearson et al. (2007) :

$$\text{SOC stock} = DA \times P \times CO$$

Où :

CO = teneur en carbone organique du sol par unité de surface ($t\ ha^{-1}$) ;

DA = la densité apparente du sol (g/cm^3)

P = profondeur de l'horizon où l'échantillon a été prélevé (0-5cm).

3.3.10. La porosité :

La détermination de la porosité totale a été réalisée sur les agrégats de sol sec, prélevés pour l'horizon de 0-30 cm. conduit à l'évaluation de la porosité texturale ou l'estimation de la porosité minimale d'assemblage (Barriuso, 1985). La porosité se calcule avec la densité réelle et la densité apparente.

3.3.11. La densité réelle (Dr) :

Elle exprime la densité des éléments constituant la phase solide du sol, la « Dr » représente la masse du solide / le volume du solide, elle est généralement entre $2,5\ g/cm^3$ et $2,6\ g/cm^3$ (Morel, 1989).

3.3.12. La densité apparente (Da) :

La densité apparente du sol (Da) représente la masse totale de l'agrégat/volume totale de l'agrégat, elle varie entre $1,00\ g/cm^3$ et $1,80\ g/cm^3$, et indique l'état ou la condition du sol, elle diminue avec l'augmentation de la teneur en humus du sol (Boudjemaa, 2007 ; Clément et al., 2003).

Calcul de la porosité par la formule suivante :

$$P \% = (Dr - Da / Dr) * 100.$$

3.3.13. Détermination du carbone total et de l'azote total (rapport C/N) :

La détermination du carbone total (C) et de l'azote total (N) dans les échantillons de sol a été réalisée avec un LECO Truspec 2000 Analyzer. A l'Université de Cerrahpsha Istanbul, Département des sciences du sol et de l'écologie, Faculté de foresterie.

Selon le protocole :

- L'analyse s'effectue par la technique de combustion : environ 0,2 g de l'échantillon de sol broyé et séché à l'étuve est pesé dans des capsules de combustion.
- Par la suite, les échantillons sont incinérés à une température élevée (environ 950–1000 °C) dans une atmosphère d'oxygène pur, ce qui entraîne l'oxydation totale de la substance organique.
- Le carbone est converti en dioxyde de carbone (CO₂) et l'azote en azote moléculaire (N₂). Sont ensuite détectés et mesurés respectivement par absorption infrarouge (pour le CO₂) et par détection de la conductivité thermique (pour le N₂).
- Le rapport C/N est ensuite calculer en divisant la teneur totale en carbone par la teneur totale pour chaque échantillon.



Figure 17 : LECO Truspec 2000. © (Dahmani C., 2021).

3.4. Traitements statistiques :

L'analyse statistique des données a été réalisée à l'aide du logiciel R (R Core Team 2019), version 3.6.2. Les résultats ont été exprimés en termes de moyenne \pm écart-type ($m \pm sd$).

Avant d'appliquer les tests statistiques, la normalité de la distribution des données ainsi que l'homogénéité des variances ont été vérifiées à l'aide des tests appropriés. Sur la base de ces vérifications, des tests paramétriques ont été retenus pour l'analyse des données.

L'effet d'occupation des sols sur les propriétés du sol a été évalué à l'aide d'une analyse de variance unidirectionnelle (ANOVA), suivie du test de Tukey pour comparer les moyennes des différentes modalités : mode d'occupation des sols, la profondeur. Le niveau de signification pour tous les tests statistiques a été fixé à $p=0.05$.

La normalité a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk sur tous les paramètres testés : le pH eau, pH KCl, la conductivité électrique, l'humidité hygroscopique, la teneur en matière organique, la teneur en carbone organique, la porosité, la texture, la densité apparente du sol, le stock de carbone organique, le stock de matière organique, calcaire totale, ainsi que le rapport carbone/azote.

Les relations entre les différents paramètres étudiés ont été examinées par la corrélation de Pearson, permettant d'identifier les associations linéaires significatives entre les variables. Les valeurs de $P = 0,05$ et de profondeur du profil ont été classées selon le test de Tukey après vérification de l'homogénéité des variances.

Une analyse des composantes principales (PCA) à l'aide d'un graphique a été adoptée afin de mettre en évidence les relations linéaires maximales possibles concernant les paramètres testés, permettant de réduire la dimensionnalité des données et de visualiser les groupes dans les différents types de sols pour les deux profondeurs.

Une classification hiérarchique ascendante (CAH) a été évaluée à l'aide du clustering agglomératif hiérarchique, cette analyse complémentaire a pour objectif d'identifier les terrains en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et pour comprendre les relations entre les types de sols et leurs propriétés.

Enfin, La carte des facteurs a également été utilisée pour illustrer la répartition des clusters sur le plan factoriel, fournissant une vision détaillée des relations entre les différents types de terrain et leurs caractéristiques écologiques.

Chapitre IV :Rèultats et Discussion

Chapitre. IV. Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

Ce chapitre est organisé en deux parties : la première est consacrée à la présentation des résultats obtenus, et la deuxième partie est réservée à la discussion des résultats et la conclusion.

4. Résultats des Analyses physico-chimiques des sols :

Dans cette partie, nous présentons une description statistique des données du sol relatives à la granulométrie, le pH eau, pH_{KCl} , à l'humidité hygroscopique, à la conductivité électrique, la teneur en MOS, la teneur en COS, la porosité, la densité apparente du sol, le stock de COS, le stock de MOS, au calcaire total, ainsi que le rapport carbone/azote.

Compte tenu des caractéristiques des stations d'étude basées sur le mode de gestion du sol, le couvert végétal, la profondeur dans chaque sous-station, on a collecté le sol à deux niveaux de 0-5cm et 0-30cm.

4.1. Statistiques descriptives :

4.1.1. Paramètres physicochimiques de la couche de 0-5 cm :

4.1.1.1. La texture :

D'après le triangle textural, les résultats de l'analyse granulométrique ont révélé que les différents modes d'occupation des sols présentaient principalement des textures argilo-limoneuses et limono-sableuses. Toutefois, la teneur en argile variait considérablement selon le mode d'occupation des sols, sa teneur était plus faible dans les terres urbaines (21 % et 18,59 %) ainsi que dans les sols cultivés, tandis que les sols agroforestiers (42 %) et pastoraux conservés (38 %) présentaient des teneurs en argile plus élevées, cela peut être causé par divers facteurs notamment les activités de gestion et les variations de la teneur en MOS. Plusieurs études ont mis en évidence l'effet positifs de l'argile sur la stabilisation du COS. Selon Kibet et al. (2022) la présence d'argile protège le CO de l'oxydation microbienne et aide à maintenir la stabilité du carbone (Saidy et al.,2013).

La teneur en limon était plus élevée dans les sols urbains que dans les autres modes d'occupation des sols, Par ailleurs, des teneurs élevées en sable ont été enregistrées dans les sols urbains (48 % et 37,86 %) ainsi que dans les vergers (45 %). Selon Xiao et al. (2015), les sols sableux favorisent une décomposition plus rapide de la matière organique que les sols argileux. Nos résultats sont cohérents avec la majorité des études, affirmant une variation significative dans la distribution des classes de texture avec les pratiques de gestion et les modes d'occupation des sols, de la même manière. Un faible pourcentage de sable grossières pour l'ensemble des modes d'occupation des sols entre 6 et 13 %, ce qui est confirmé que les sols étudiés sont généralement dominés par une texture fine (figure 18).

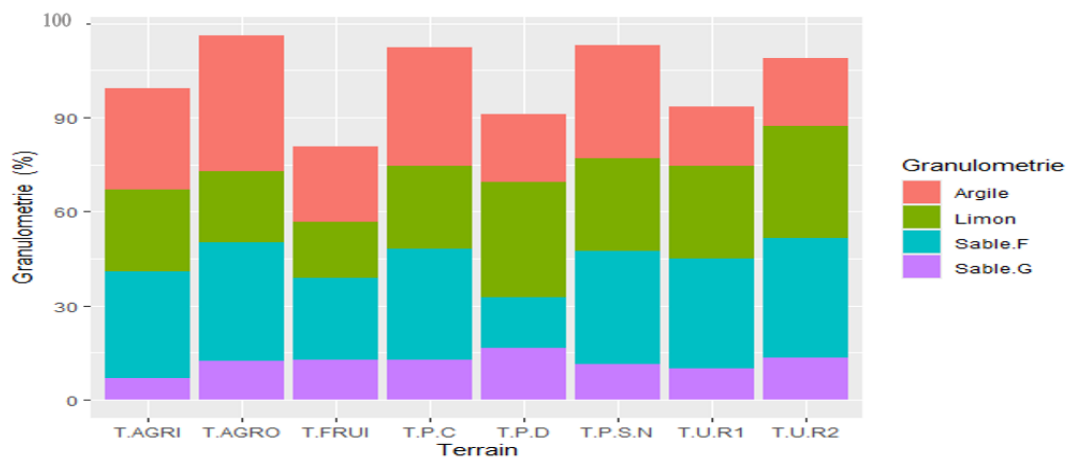


Figure 18. Proportion des éléments granulométrique selon le mode d'occupation des sols (%).

4.1.1.2. pH eau :

Les valeurs du pH eau varient entre 7,17 et 8,72, montrent une réaction neutre à moyennement alcalin dans les stations étudiées (Figure 19). Cette constatation peut être attribuable à la concentration plus élevée de cations dans la couche supérieure des sols urbains et pastoraux dégradés.

Regasa (2023) a signalé des valeurs de pH plus faible dans les terres cultivées et les prairies comparativement aux terres boisées. Cela pourrait être dû à l'épuisement des cations basiques causé par la récolte et l'alimentation animale.

Le sol agroforestier montre des valeurs neutres à moyennement alcalin affichent une concentration plus élevée en COS, tandis que les teneurs les plus faible en COS a été enregistré dans les sols largement alcalin à acide (autour de 7,5 - 8,5), ce qui est reflète l'effet des pratiques culturales et des apports organiques qui tendent à tamponner le pH notamment dans les terrains pastoraux dégradés et les milieux urbains.

4.1.1.3. pH KCL :

Les valeurs du pH KCl varient entre 6,5 et 7,64 selon les différents modes d'occupation des sols, traduisent des sols peu acides à neutre voire faiblement alcalins. Les sols sous l'agroforestier présentent un pH proche de la neutralité, ce qui est reflète une stabilité chimique probablement liées aux apports organiques provient de la composition de la litière, ce qui est favorise une bonne structuration du sol et diminue l'acidification par contre aux milieux urbains.

En effet, Les résultats montrent que les sols sous les sols urbains avaient une valeur de pH inférieure à 7,64. Cela pourrait être dû à la conversion de l'espace naturel en terrains urbains Cette urbanisation, accompagnée par le développement des infrastructures, entraîne la dominance de surfaces artificialisées, modifiant la dynamique des cations de surface et réduisant progressivement le couvert végétal.

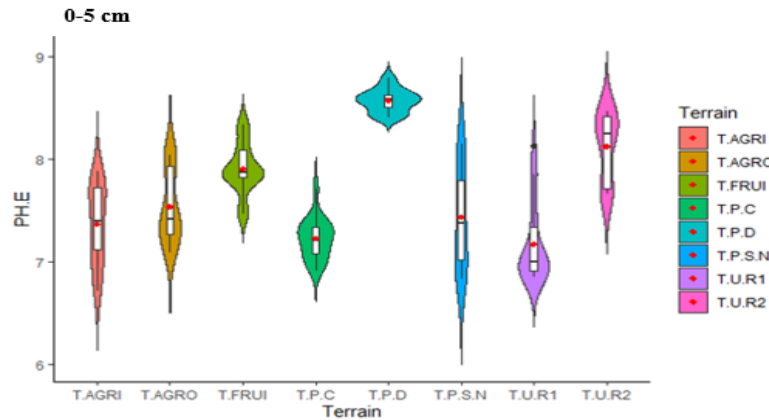


Figure 19. Variation du pH eau (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.

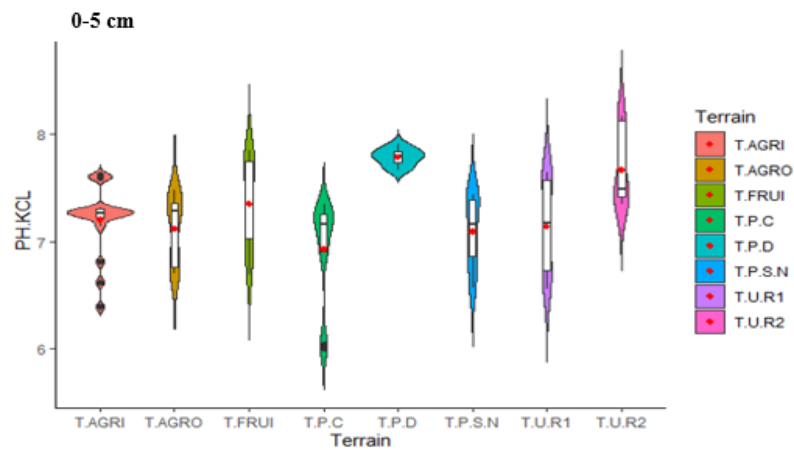


Figure 20. Variation du pH_{KCl} (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.1.1.4. La conductivité électrique :

La conductivité électrique (CE) était de l'ordre de 236,84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sous les sols agroforestiers et de 210,47 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sous les sols pastoraux avec 292,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sous les vergers, ce qui indiquait un faible niveau de salinité. En revanche, les terres cultivées présentent des valeurs plus élevées, atteignant 331,94 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette augmentation pourrait être attribuée aux pratiques agricoles intensives, notamment l'utilisation d'engrais et d'amendements, qui favorisent l'accumulation de sels solubles dans le sol.

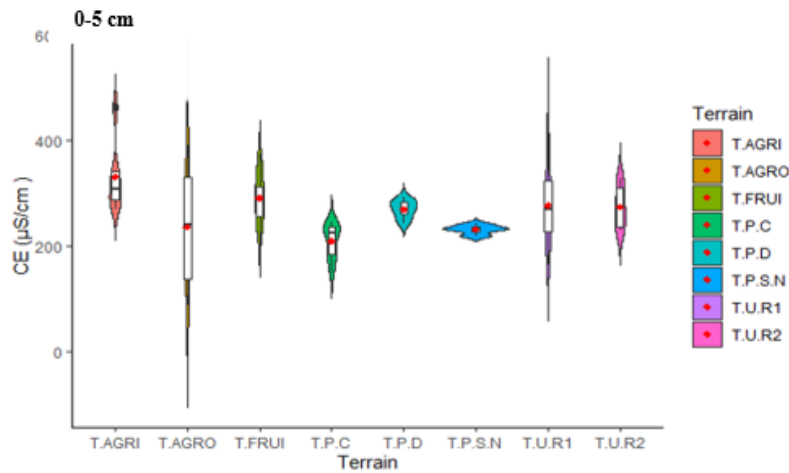


Figure 21. Variation de la conductivité électrique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.1.1.5. L'humidité hygroscopique :

L'humidité hygroscopique correspond à la quantité d'eau retenue à la surface externe des particules du sol et en équilibre avec la pression et l'humidité atmosphérique (Milia, 2011). Elle est fortement liée aux conditions environnementales et aux pratiques de gestion, pouvant ainsi varier sous l'effet de l'irrigation, de la proximité des zones humides ou encore des conditions météorologiques et saisonnières.

Les résultats (figure 22) montrent des différences significatives entre les modes d'occupation des sols ($p < 0,05$). La validité de ces résultats à la surface du sol est relative, car les sols sont constamment affectés par les changements environnementaux et l'humidité varie rapidement dans le haut. Cependant, la teneur en humidité du sol la plus élevée a été enregistrée pour les sols agroforestières (3,7 %) et les sols pastorales (2,9 %). L'humidité du sol pour les vergers a été trouvée (2,9 %), ce qui peut être attribué à une combinaison de pratiques de gestion de l'irrigation et d'amendement organique dans la couche superficielle supérieure. L'humidité du sol la plus faible a été enregistrée pour les zones urbaines (2,3 %) et les terres cultivées (2,6 %). Des résultats similaires ont été rapportés, des valeurs plus faibles d'humidité du sol sous les terres cultivées par rapport aux prairies dans la région d'Oromia, en Éthiopie, par Girma et al. (2023). Cela pourrait être attribué au labourage continu ainsi qu'à l'exposition de la couche supérieure au rayonnement solaire, entraînant une perte significative d'humidité du sol.

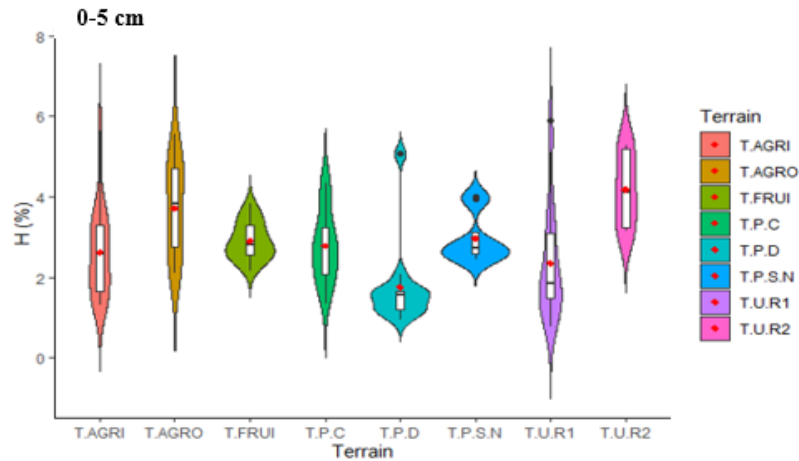


Figure 22. Variations de la teneur en humidité hygroscopique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.1.1.6. Carbonate de calcium :

L'analyse a révélé que la répartition du carbonate de calcium variait de manière modérée entre les différents modes d'occupation des sols (figure 23). Les concentrations moyennes en CaCO_3 ont été estimées à 22,2 % pour les systèmes agroforestiers, 21,9% pour les terres pastorales conservé pour les vergers fruitiers et 22,35% pour les terres cultivées. Cette distribution reflète l'influence de la lithologie régionale, caractérisée par la présence de formations carbonatées, pour les sols pastoraux semi naturels 22,36%. Par ailleurs, bien que la plus forte valeur été observée dans les sols urbains avec 23,12 % et 22,83 %, suggérant l'impact de l'urbanisation et les activités anthropiques ce qui est peut induire une altération des propriétés du sol d'origine, notamment en modifiant la perméabilité (Noori et Ismaeal, 2023).

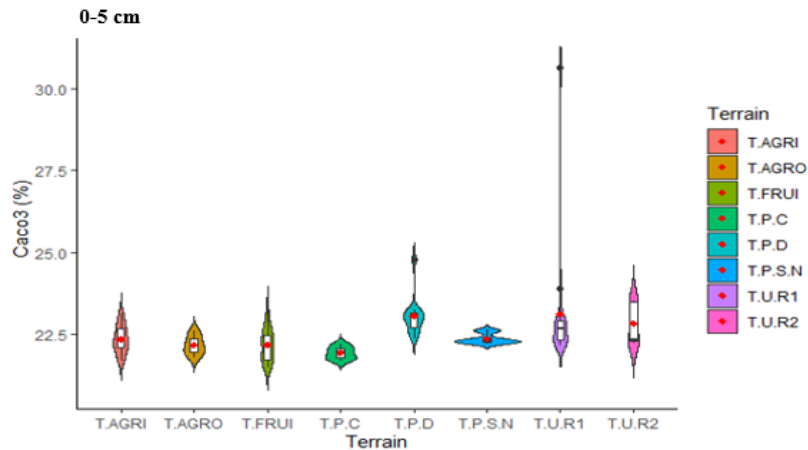


Figure 23. Variation de la teneur en carbonate de calcium (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.1.1.7. Carbone organique et matière organique des sols :

L'histogramme ci-dessus montre que les niveaux les plus élevés de MOS, COS sont observés dans le sol naturel par rapport au sol cultivé, Les sols agroforestiers et pastoraux conservés ont des valeurs élevées de COS avec 2,50 % et 2,34% respectivement, suivis des terrains cultivés avec des valeurs intermédiaires 1,45 % et 1,24 % et les terrains pastoraux semi-naturels avec 1.57%, et les terrains urbains ont des valeurs relativement faibles 0,42% et 0,68%. Ces résultats concordent avec ceux de (Kalambukattu et al.,2013) pour la même profondeur et le même type d'occupation des sols ont signalé une concentration élevée de COS dans les (0-5 cm) sous les terres agroforestières, en raison de l'apport élevé de végétation.

Les terrains pastoraux présentent des valeurs intermédiaires de COS, ce qui est lié à la fois à l'apport de résidus végétaux et au pâturage non durable. Ce dernier constitue l'un des problèmes de gestion des terres les plus répandus dans le monde, en particulier dans les zones rurales défavorisées, marginalisées et dépeuplées. Les prairies méditerranéennes, quant à elles, sont soumises à de nombreuses pressions environnementales et anthropiques, ce qui entraîne de graves dysfonctionnements dans leur fonctionnement écologique (Kairis et al.,2015).

Selon (Saifi et al.,2017) le surpâturage est l'un des facteurs les plus dominants de la dégradation des terres en Afrique du Nord. En conséquence, le surpâturage aggrave le stress des espèces végétales déjà affaiblies par les changements climatiques (Matallah et al.,2024).

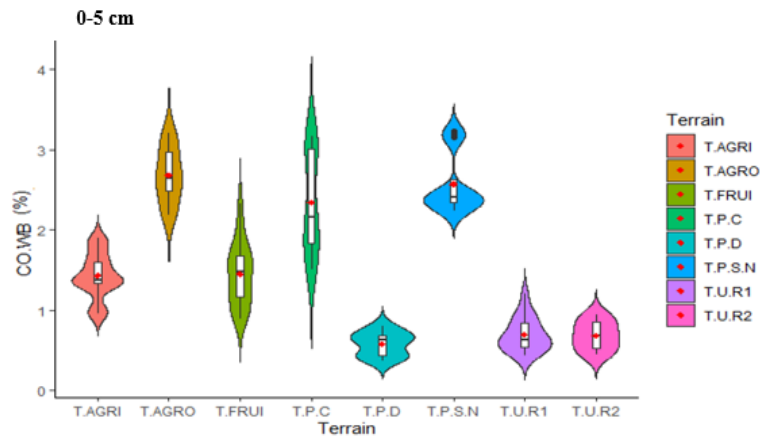


Figure24. Variation de la teneur en carbone organique (0-5cm) selon le mode d’occupation des sols.

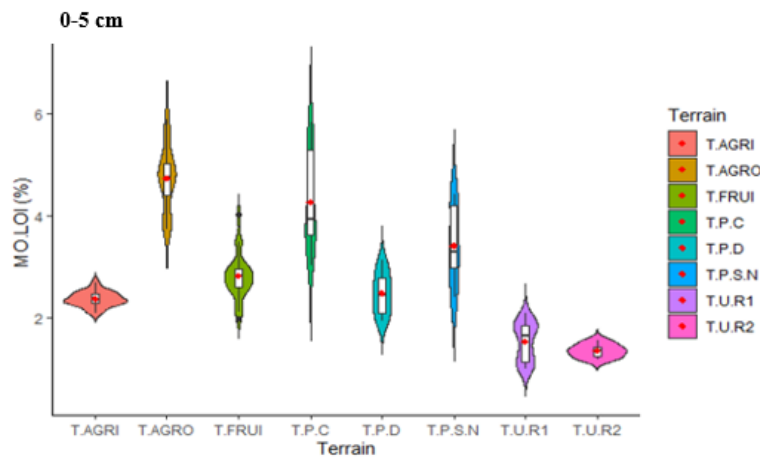


Figure 25. Variation de la teneur en matière organique (0-5cm) selon le mode d’occupation des sols.

4.1.1.8. La densité apparente :

La densité apparente du sol (DBS) était significativement plus élevée dans les sols urbains, avec des valeurs de 1,56 Mg/m³ et 1,46 Mg/m³. Cette augmentation est attribuée à l'effet des constructions et des aménagements urbains, qui diminuent la porosité du sol et conduit à une

teneur en MOS inférieure et renforcent la composition du sol. Les résultats de cette étude sont en correspondance avec les résultats des travaux de (Benslama et al.,2024), qui révèlent que les valeurs les plus élevées reflète le compactage attendu dans les sols urbains. Les terrains pastoraux dégradés relèvent des valeurs élevées avec $1,50 \text{ Mg/m}^3$, Cela est dû à l'effet de piétinement des animaux qui a tendance à accroître la compaction et donc la densité apparente. (figure 26). La valeur la plus basse du DA était sous les sols agroforestières avec $1,26 \text{ Mg/m}^3$, suivie par les sols pastoraux conservés avec $1,34 \text{ Mg/m}^3$. Cette différence pourrait être liée à la contribution plus élevée du COS, car de meilleures pratiques de gestion des terres conduisent à une meilleure accumulation de la MOS et cela est probablement dû au fait que ces utilisations des terres sont gérées sur une base durable. Ces constatations concordent avec celles de (Kibet et al.,2022), qui a également constaté une densité apparente plus faible sous les sols agroforestiers pour la même profondeur de sol. Selon (Seifu et al., 2020 ; Mishra et Sarkar, 2020), une densité apparente du sol plus faible indique que les sols sont moins compactés. Cependant, la densité apparente dans les sols cultivées a montré des valeurs similaires allant de $1,45 \text{ Mg/m}^3$ pour les terres cultivées à $1,46 \text{ Mg/m}^3$ pour les vergers mais il était inférieur sous les vergers par rapport aux terres agricole, il semble être lié à la différence dans l'ajout de l'amendement organique, la conversion des terrains naturelles comme les forêts en terre urbaines ou agricole entraine une augmentation de la densité apparente raison d'une plus grande compaction du sol. Selon (Yitbarek et al.,2013), lorsque la période de culture a augmenté, la densité apparente a augmenté de manière significative. Plusieurs études ont mis en évidence que la densité apparente du sol peut être affectée par le changement d'occupation des sols et le contenu de COS (Vandana et al.,2023).

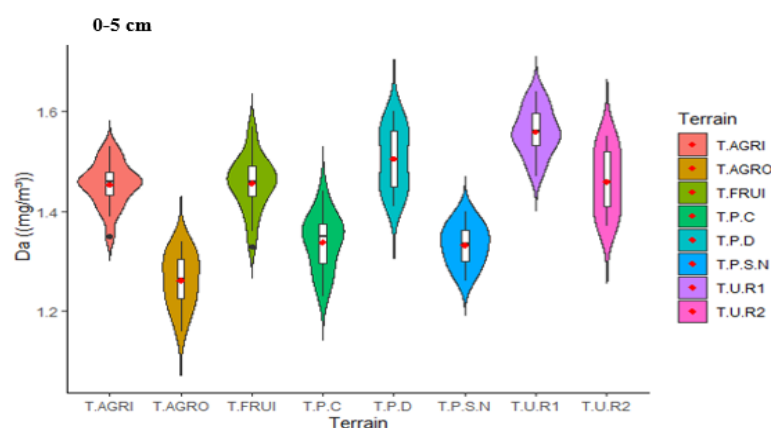


Figure 26. Variation de la densité apparente (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.1.1.9. Variation des stocks de carbone organique et de matière organique :

Le stockage du carbone organique dans le sol a montré une différence significative selon toutes les modes d'occupation des sols. Cependant, les valeurs les plus élevées ont été observées dans les systèmes présentant la plus grande diversité végétale, notamment l'agroforesterie (23,10 t ha⁻¹) et les terres pastorales (19,98 t ha⁻¹), respectivement. Ces résultats sont en accord avec les résultats de Marselianti et al. (2023), qui ont établi une corrélation significative entre les stocks de COS et la formation végétale dans la couche superficielle du sol. Plusieurs études ont indiqué que les stocks de COS peuvent varier d'une région à l'autre en fonction de variables environnementales, notamment : l'utilisation des terres, la couverture végétale, la température et les précipitations, la texture du sol (Chen et al., 2020 ; Machado et al., 2024).

La valeur minimale des stocks a été enregistrée pour les terres urbaines par rapport à tous les modes d'occupation des sols avec 8,89 t ha⁻¹ et 7,67 t ha⁻¹, ce qui signifie qu'il y a moins de décomposition de MO et un apport limité, tandis que les sols sous les sols cultivées et les vergers contiennent 14,51 t ha⁻¹ et 14,46 t ha⁻¹, respectivement (tableau 07). Peut être attribué aux amendements organiques qui contribuent à l'accumulation de CO dans le sol.

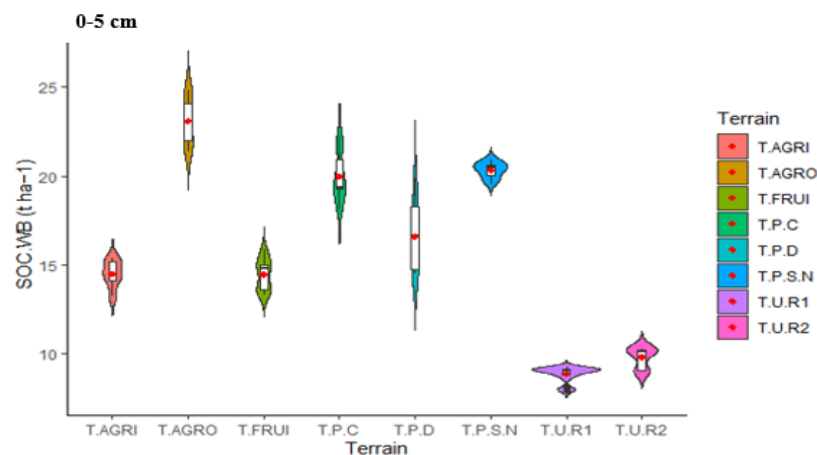


Figure 27. Variation des stocks de carbone organique et de matière organique selon le mode d'occupation des sols.

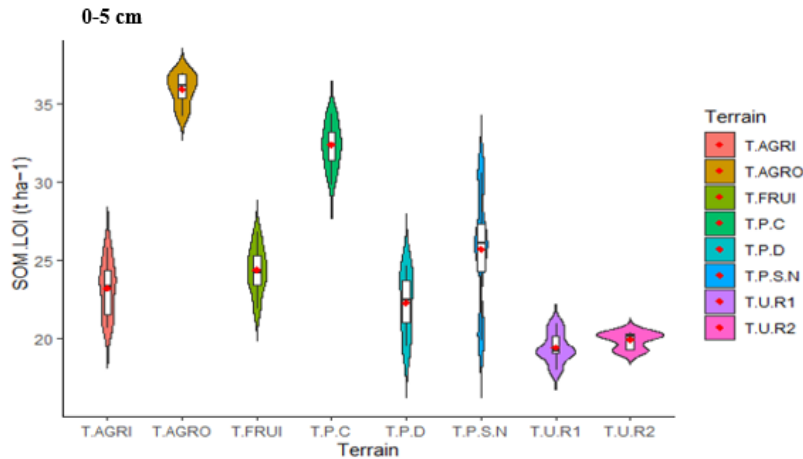


Figure 28. Variations des stocks de matière organique (0-5cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.1.1.10. Le rapport C/N :

Le rapport C/N est un indicateur important de la MOS, dont le COS et l'azote constituent les principaux éléments (Mahdi et al.,2022 ; Benslama et al.,2024). Le COS et l'azote sont considérés comme des indicateurs essentiels grâce à leurs apports significatifs à la qualité du sol, à sa fertilité et à la productivité des cultures. De plus, le pourcentage d'azote peut contrôler les stocks de COS en influençant sa décomposition (Gao et al.,2023). Le COS et l'azote du sol ne peuvent pas seulement indiquer le niveau de fertilité du sol, mais aussi montrer l'évolution du système écologique régional. Ils peuvent être représentés par le rapport C/N du sol, un indicateur sensible de la qualité du sol et pour évaluer le cycle de nutrition du carbone et de l'azote dans les sols (Zhang et al., 2010 ; Draoui et al.,2018).

Le rapport C/N dans le sol a montré une différence significative ($p \leq 0.001$) entre les différents modes d'occupation des sols. Cependant, les valeurs les plus élevées ont été observées sous les systèmes urbains, avec des rapports C/N de 19,8 et 17,7, respectivement. Cela peut expliquer par le faible apport de la MO et sa minéralisation lente due aux activités humaines. Tandis que les sols sous les terres cultivées et les vergers présentent des rapport C/N de 13,83 et 13,5, respectivement. Ce qui reflète une décomposition moyenne de MOS et favorisent la minéralisation de l'azote. Nos résultats en accord avec ceux de Benslama et al. (2024), qui ont également indique un fort rapport de C/N sous les terres urbaines que les terres cultivées. Le rapport C/N est directement influencé par des facteurs tels que la couverture végétale, l'utilisation des terres, les amendements introduits, l'intensité de fertilisation et le taux de

décomposition de la matière organique (Tedone et al.,2022). Le rapport C/N été plus faible sous les systèmes agroforestiers et pastoraux conservés, avec des valeurs de 9,01 et 10,71, respectivement. Cela pourrait être attribué au fait que la MOS est riche en carbone et en azote favorisent sa décomposition, la minéralisation des nutriments aux plantes ainsi que l'activité biologique du sol ainsi que la séquestration du carbone. Sous les pastoraux dégradées et semi naturelle le rapport C/N est de 12,91 et 11,6, respectivement ce qui indique une minéralisation plus lente de la matière organique. Cette situation peut ralentir la libération des nutriments et influencer la dynamique du stockage du CO dans le sol.

Tableau 07 : Variation du rapport carbone/azote (C/N) selon les différents modes d'occupation des sols de la couche (0-5cm).

Occupation du sol	T.AGRI	T.AGRO	T.FRUI	T.P.C	T.P.D	T.P.S.N	T.U. R1	T.U.R 2
C/N	13,83 ± 0.06	9,01 ± 2.75	13,5 ± 0.00	10,71 ±0.01	12,91± 0.01	11,6 ± 0.03	19,8± 0,01	17,7 ± 0,00

4.2.Paramètres physicochimiques de la couche de 0-30 cm :

Les variations des paramètres physico-chimiques entres les sites étudiés de la couche de 0-30 cm. La représentation de chaque paramètre permet de discuter éventuellement les variations et l'évolution correspondante au niveau de chaque site de prélèvement.

4.2.1. pH eau :

Les mesures de pH eau dans les terrains étudiés, se situent entre 7,16 et 8,72 indiquent des conditions neutres à légèrement alcalines. Sous les sols agroforestiers est de 7,59, tandis que sous les vergers il est de 7,58 présentant un caractère légèrement alcalin. Les résultats montrent également que les sols sous terre pastoraux conservés présentent un pH de 7,16 proche de la neutralité. Les terrains pastoraux dégradés se caractérisent par un sol fortement alcalin avec une valeur de 8,53. Les terrains de parcours semi-naturels affichent un pH de 7,40, ce qui indique une légère alcalinité. Par ailleurs, les terrains urbains présentent des valeurs élevées de 8 et 8,04 typiques de conditions alcalines.

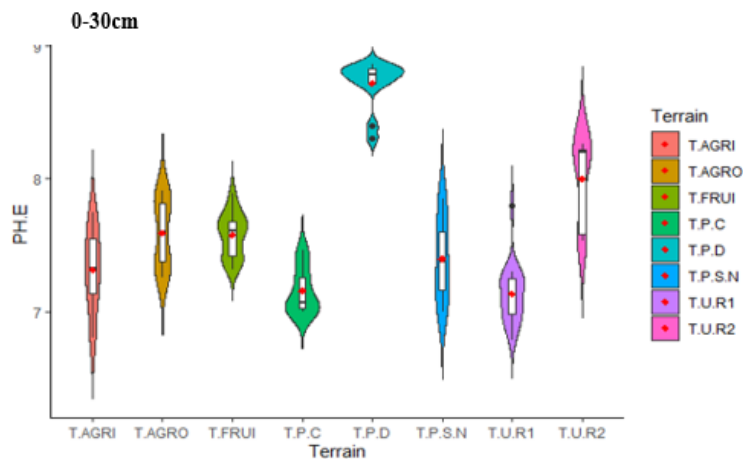


Figure 29. Variation du pH eau (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.2.2. pH_{KCL} :

Les mesures de pH_{KCL}, indiquent des conditions neutres à légèrement alcalines sur l'ensemble des modes d'occupation des sols, avec des valeurs allant de 6,48 à 7,64. Les sols agroforestiers et agricoles ainsi que les sols de parcours semi naturels indiquent des conditions neutres à légèrement alcaline de 7,21 et 7,02, respectivement. Les terrains pastoraux conservés près de la neutralité de 6,48. Les terrains pastoraux dégradés montrent une caractéristique plus alcaline de 7,63. Les valeurs de pH des terrains urbains sont respectivement de 6,84 et 7,64 indiquant des conditions proches de la neutralité a un caractère légèrement alcalin.

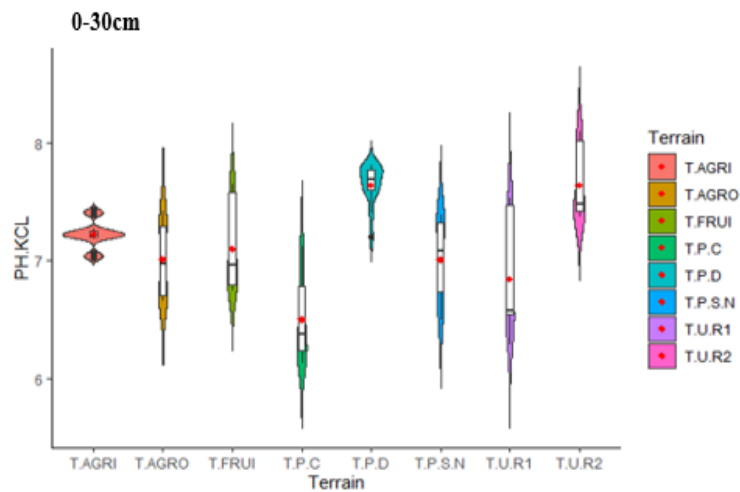


Figure 30. Variation du pH_{KCL} (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.2.3. La conductivité électrique :

La conductivité électrique (CE) des sols étudiés présente des niveaux modérés à élevés sous les terrains agricoles, avec une valeur de 367,61 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui pourrait être liée aux pratiques d'irrigation. Les vergers affichent une valeur de 298,10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les autres modes d'occupation des sols présentent des valeurs variables, notamment les terres pastorales conservées avec 207,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les terres pastorales dégradées avec 256,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et les parcours semi-naturels avec 203,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les terrains urbains montrent également des valeurs relativement élevées, avec 321,56 et 286,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$, traduisant une variabilité spatiale de la salinité du sol.

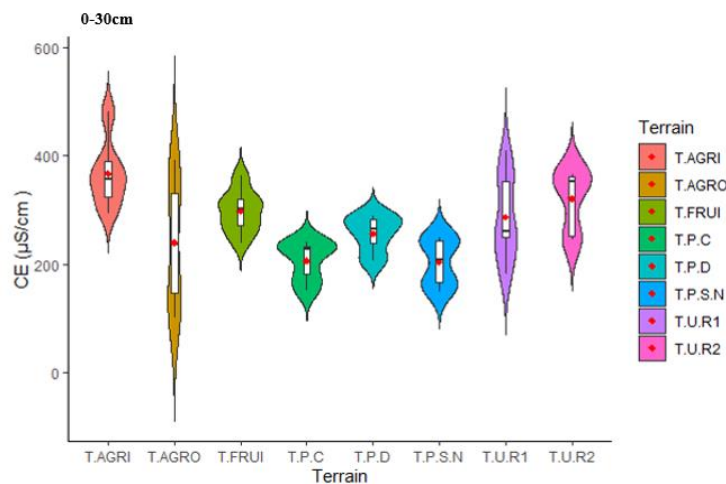


Figure 31. Variation de la conductivité électrique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.2.4. Calcaire total (CaCO_3) :

Les teneurs en carbonate de calcium mesurées indiquent des sols modérément calcaires entre 21,14 à 23,85 %. Les systèmes agroforestiers et pastoraux conservés avec 23,15 % et 23,48 %, respectivement. Les valeurs les plus faibles sont observées les terrains agricoles, les vergers, les terres pastorales conservées et les parcours semi-naturels, avec des teneurs comprises entre 21 % et 22 %. Cette distribution est le reflet de l'impact de la lithologie régionale, marquée par la présence de formations carbonatées.

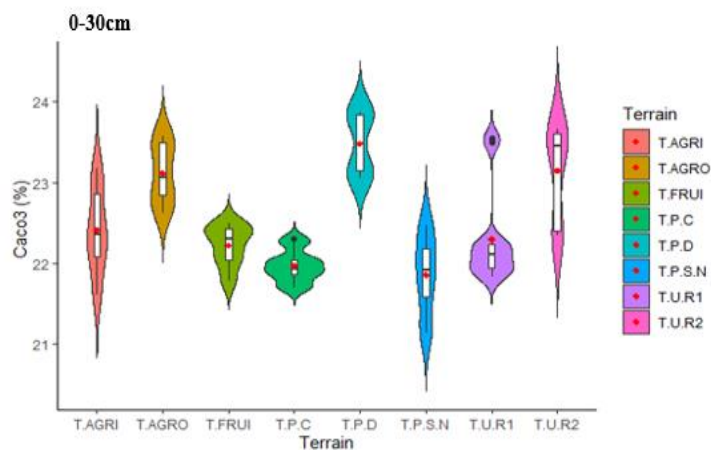


Figure 32. Variation de la teneur en carbonate de calcium (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.2.5. Humidité hygroscopique (H%)

On observe une variation de l'humidité hygroscopique comprise entre 2,98 % et 5,11 % selon les différents modes d'occupation des sols. Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées dans les sols agricoles (2,98 %), ce qui peut s'expliquer par la perturbation régulière due aux activités culturales ainsi qu'à une moindre teneur en argile et en MOS. Les sols agroforestiers présentent une humidité moyenne de 3,66 %, attribuable à la combinaison des pratiques de gestion et à la présence d'un couvert végétal, favorisant la stabilité structurale et l'accumulation de MO. Les vergers affichent des valeurs plus élevées (4,48 %), probablement en raison de l'irrigation et des apports organiques. Les terrains pastoraux conservés atteignent les taux les plus importants (5,11 %), liés à la présence d'une couverture végétale spontanée et de systèmes racinaires développés, qui renforcent la MO et la capacité de rétention d'eau. Enfin, les terrains pastoraux dégradés et urbains présentent des valeurs intermédiaires, comprises entre 3,93 % et 4,51 %, traduisant une capacité hygroscopique moyenne.

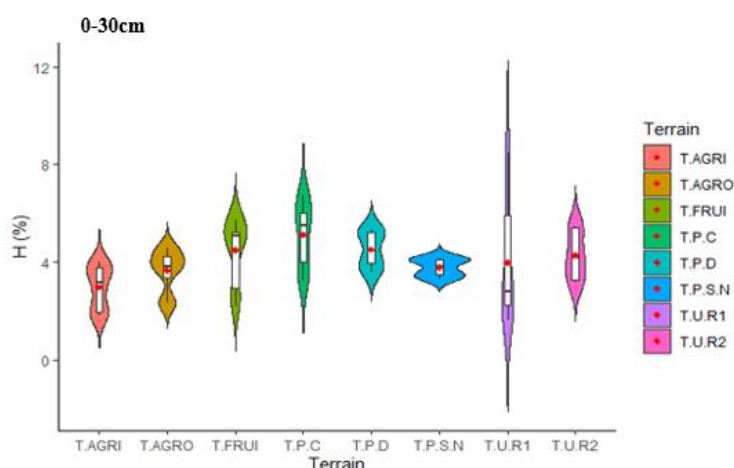


Figure 33. Variations de la teneur en humidité hygroscopique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.2.6. Carbone organique et matière organique des sols :

Les résultats indiquent que la teneur en COS varie selon le mode d'occupation des sols. Les systèmes agroforestiers (1,89 %) et les terres pastorales conservées (1,85 %) présentent les valeurs les plus élevées. Les parcours semi-naturels et les vergers montrent des teneurs intermédiaires, respectivement de 1,29 % et 0,95 %. En revanche, les terres agricoles (0,58 %) et les sols urbains (0,39 à 0,33 %) présentent les valeurs les plus faibles, traduisant l'effet négatif de l'intensification agricole et de l'urbanisation sur les stocks de carbone organique du sol.

Par ailleurs, l'analyse selon la profondeur montre une diminution du COS de la couche superficielle (0–5 cm) vers la couche plus profonde (0–30 cm). Cette tendance s'explique par l'accumulation des résidus végétaux en surface, associée à une activité biologique plus intense dans les horizons superficiels, tandis que les horizons profonds reçoivent moins d'apports organiques.

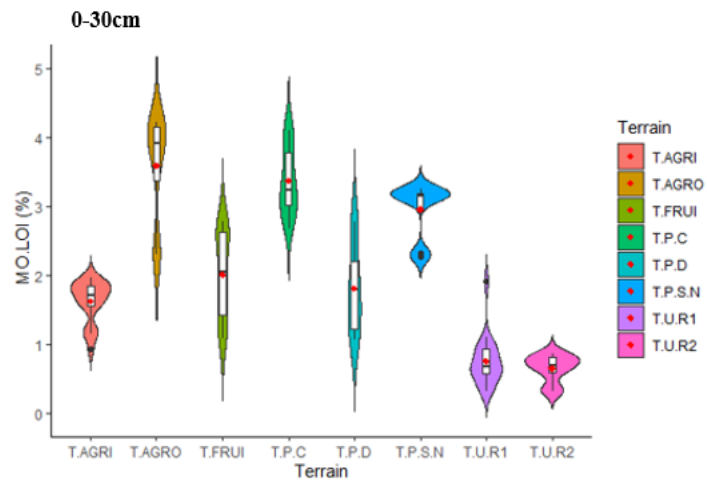


Figure 34. Variation de la teneur en carbone organique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.

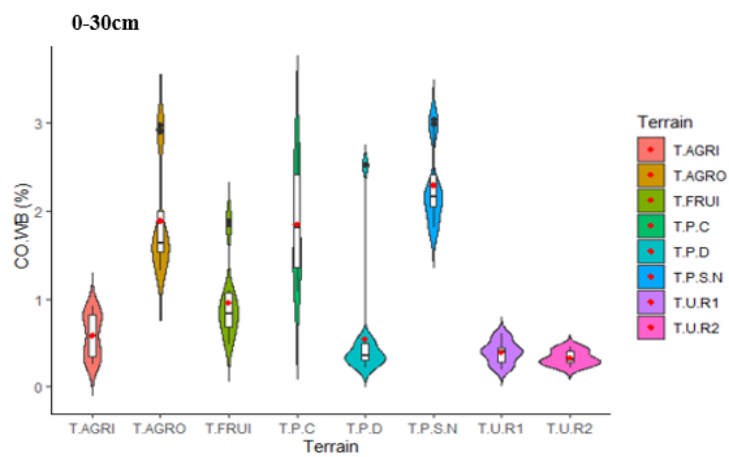


Figure 35. Variation de la teneur en matière organique (0-30cm) selon le mode d'occupation des sols.

4.2.7. La Porosité :

La relation entre la densité apparente et la densité réelle définit la porosité du sol. Il est défini comme le volume relatif du vides présents dans la roche et cela dépend de la granulométrie (Saidi, 2010). Nos résultats ont montré que les terrains agroforestiers (63,92 %) et les pâturaux conservé (60,16 %) présentent les taux les plus élevés de la porosité, suivis par les pâturaux semi-naturels (58,72 %). Ces terrains possèdent une structure plus stable et aérée, qui favorise l'infiltration de l'eau, la circulation de l'air. Les terres agricoles (39,34 %) et les vergers (42,42 %), les pastoraux dégradé affichent des valeurs de porosité inférieures cette diminution due à l'exploitation mécanique et des méthodes agricoles intensives, qui réduisent le volume des pores ce qui est influence les circulations d'eau et d'air. Les sols urbains (16,09 % et 20,5 %) montrent les taux les plus faibles, témoignant d'une compaction importante.

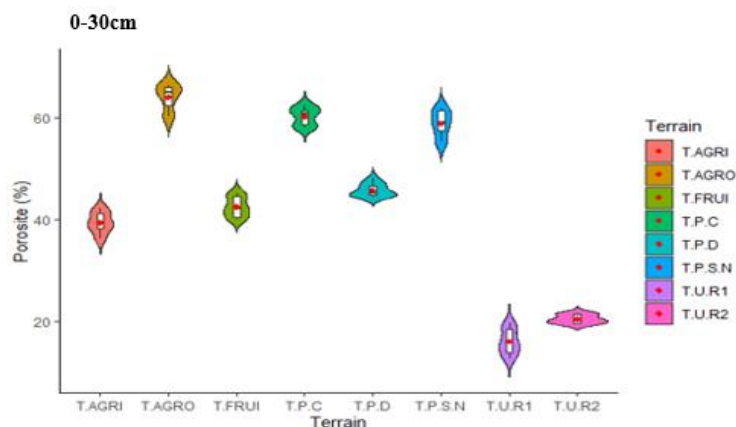


Figure 36 : Variation de la porosité (0-30cm) des sols selon le mode d'occupation des sols.

4.2.8. Rapport C/N :

L'étude révèle un impact notable des systèmes d'occupation des sols sur le rapport C/N. Les valeurs les plus faibles sont observées sous les systèmes agroforestiers et les sols pastoraux conservés, avec des rapports respectifs de 5,06 et 8,21. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sous les terrains urbains, avec 15 et 14,60, traduisant une minéralisation plus lente

de la MOS et une disponibilité plus limitée de l'azote. Les terres pastorales semi-naturelles et dégradées ainsi que les terrains cultivés présentent des valeurs intermédiaires, indiquant un degré de décomposition moyen de la MOS et une disponibilité modérée en azote. Ces variations sont principalement attribuées aux différences d'apports en matière organique et au niveau d'anthropisation des différents modes d'occupation des sols.

Tableau 08 : Variation du rapport carbone/azote (C/N) selon les différents modes d'occupation des sols de la couche (0-30cm).

Occupation du sol	T.AGRI	T.AGRO	T.FRUI	T.P.C	T.P.D	T.P.S.N	T.U. R1	T.U.R2
C/N	9,25 ± 0,02	5,06 ± 0,001	9,10 ± 0,00	8,21± 0,001	11,36± 0,01	8,6 ± 0,01	15 ± 0,08	14.60 ± 0,03

4.3. Analyses de variance (ANOVA) :

4.3.1. ANOVA des paramètres physico-chimiques pour les deux couches (0-5 cm et 0-30cm) :

Les résultats ont révélé des variations significatives entre les différents modes d'occupation des sols dans le Nord-Est de l'Algérie pour les deux profondeurs étudiées (0–5 cm et 0–30 cm) (Figure 37 ; Tableau 9). Parmi les paramètres analysés, seuls certains sont communs aux deux couches. L'analyse de variance (ANOVA) a donc été appliquée uniquement à ces paramètres, à savoir : la matière organique (MO), le carbone organique du sol (COS), le carbonate de calcium (CaCO₃), le pH (eau et KCl), l'humidité hygroscopique (H) et la conductivité électrique (CE) ainsi que le rapport C/N. Les résultats montrent que les systèmes agroforestiers et les terres pastorales conservées présentent des teneurs significativement plus élevées ($p \leq 0,001$) en MO et COS par rapport aux autres modes d'occupation des sols, avec une augmentation marquée dans la couche superficielle (0–5 cm). À l'inverse, les terrains urbains présentent les valeurs les plus faibles. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Olujobi et al. (2022), qui ont montré que les teneurs les plus élevées en MOS et COS sont observées dans les couches superficielles par rapport aux couches plus profondes. Ce phénomène s'explique par un apport plus important de litière végétale et sa décomposition en surface, favorisés par une activité biologique et microbienne plus intense, notamment dans les terres arables et les systèmes agroforestiers.

En revanche, les terres cultivées, les prairies et les sols urbains présentent des teneurs plus faibles en MOS et en COS dans la couche 0-30 cm. Cela traduit l'effet des pratiques de gestion sur les stocks de carbone du sol (Soussana et al., 2004), ainsi que l'apport de matière organique d'origine animale facilement dégradable, pouvant stimuler la minéralisation de la MOS. Cette diminution peut également être expliquée par les processus d'érosion et de lessivage liés à la dégradation du sol (croûte de battance, compaction), ou encore par l'interaction entre le couvert végétal et un pâturage continu et intensif dans les zones enrichies en éléments fins (Ndiaye et al., 2014 ; Pei et al., 2008).

La teneur en carbonate de calcium était la plus élevée dans les sols urbains que les autres modes d'occupation des sols. Cela indique que le contenu en calcaire est significativement plus élevé dans les terrains urbains pour les deux profondeurs. Ce qui est expliqué par l'effet d'urbanisations ainsi que l'usage des sols.

Selon (Noori et Ismaeel, 2023) un taux plus élevé de carbonate de calcium modifie la formation du sol d'origine et peut influencer le rapport de perméabilité ainsi que le développement des couches.

Les niveaux de CE étaient les plus élevés dans les terres cultivées de la couche 0-30 cm plus que la couche superficielle de 0-5 cm. Probablement associé à l'utilisation d'intrants et de l'irrigation, alors que les valeurs les plus basses sont observées dans les pastoraux.

La couche supérieure présente des valeurs plus élevées d'humidité du sol par rapport aux profondeurs de 0-30 cm dans les pastoraux et les terrains urbains, les vergers alors que les terres agricoles et agroforestiers ne montrent aucune différence significative. Il est donc prévu que l'humidité du sol sera affectée par l'irrigation ou la proximité des zones humides, ainsi que par les conditions météorologiques influençant la surface du sol et les saisons.

Les différences de pH (eau, KCL) sont plus marquées dans la couche supérieure pour toutes les modes d'occupation des sols. Pour le pH KCL une variation significative a été marquée pour les deux profondeurs pour toutes les modes d'occupation des sols. Selon (Semai, 2017 ; Lakehal et al., 2023) le type de matériau parent et la couverture végétale, la topographie sont des variables qui ont affecté le pH du sol (Lakehal et al., 2023). Dans l'ensemble l'étude relève que la gestion du sol et la profondeur ont un effet significatif sur les propriétés des sols.

Par ailleurs, les variations du rapport C/N entre les deux couches étudiées de (0-5 cm et 0-30 cm) mettent en évidence une diminution avec la profondeur, soulignant le rôle de la couche superficielle dans l'accumulation de la matière organique et des nutriments.

Tableau 09. Résultats de l'ANOVA pour les paramètres physico-chimiques selon le mode d'occupation des sols et de l'interaction terrain-profondeur.

Paramètres	Facteur					
	Terrain (ddl = 7)		Profil (ddl = 1)		Terrain profil (ddl=15)	
	P value	Observation	P value	Observation	P value	Observation
CO	0.272	***	61.930	***	2.2e-18	***
pH eau	0.698	***	0.387	***	0.7596	ns
CaCO ₃	2.163e-11	***	0.957	***	2.583e-13	***
H	0.004092	**	5.705e-12	***	1.951e-15	***
CE	< 2.2e-16	***	0.472	***	4.51e-16	***
MO	< 2.2e-16	***	5.371e-07	***	< 2.2e-16	***
pH _{KCl}	< 2.2e-16	***	0.002844	**	< 2.2e-16	***
C/N	< 2.2e-17	***	7.0358	***	< 2.2e-17	***

NB : * (p ≤ 0.05), ** (p ≤ 0.01), * (p ≤ 0.001), ns (p > 0.05)**

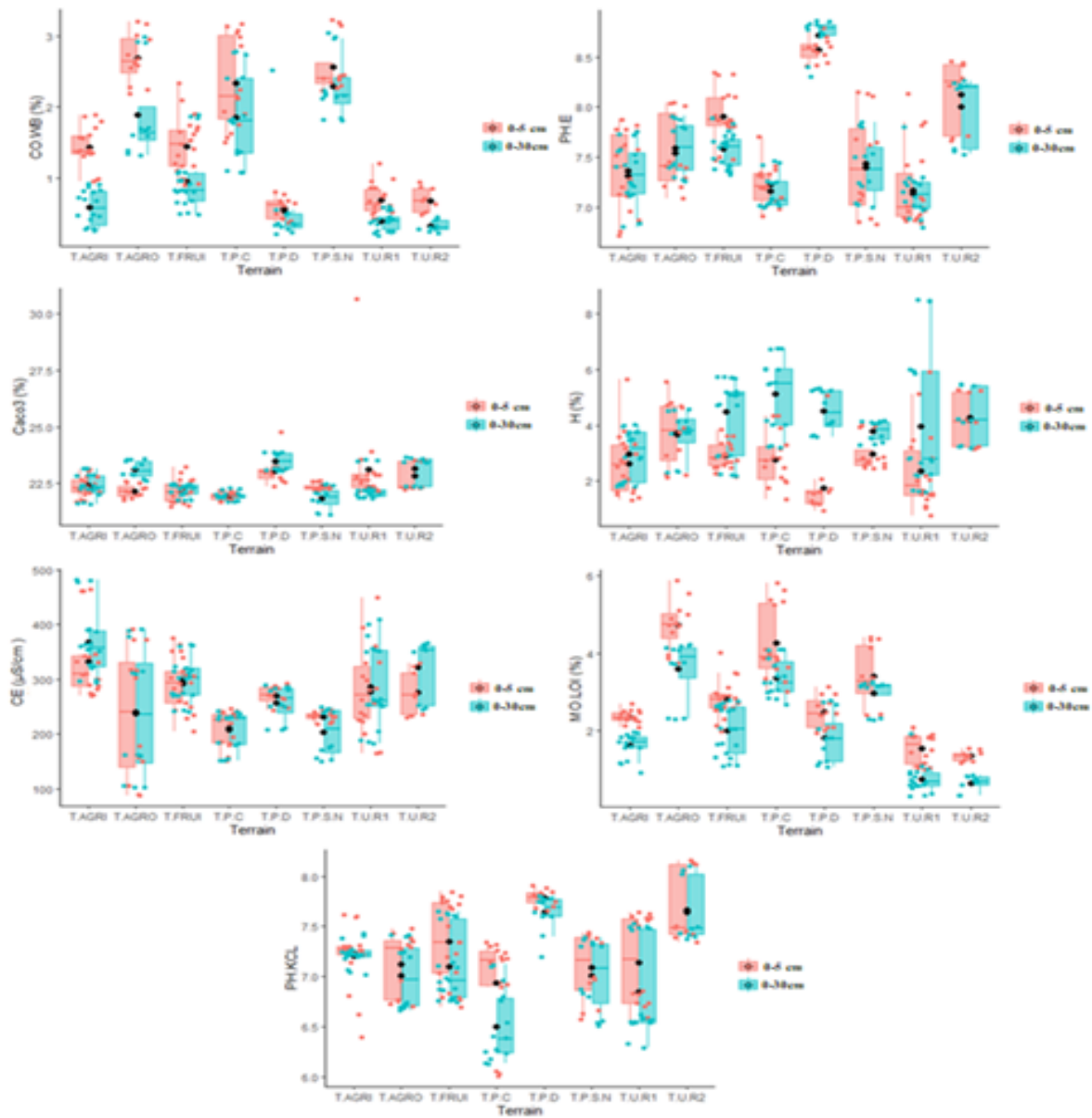


Figure 37. Variations moyennes des paramètres physico-chimiques en fonction des modes d'occupation des sols et des profondeurs (0-5 cm et 0-30 cm).

4.3.2. ANOVA à deux facteurs : Terrain - Profondeur

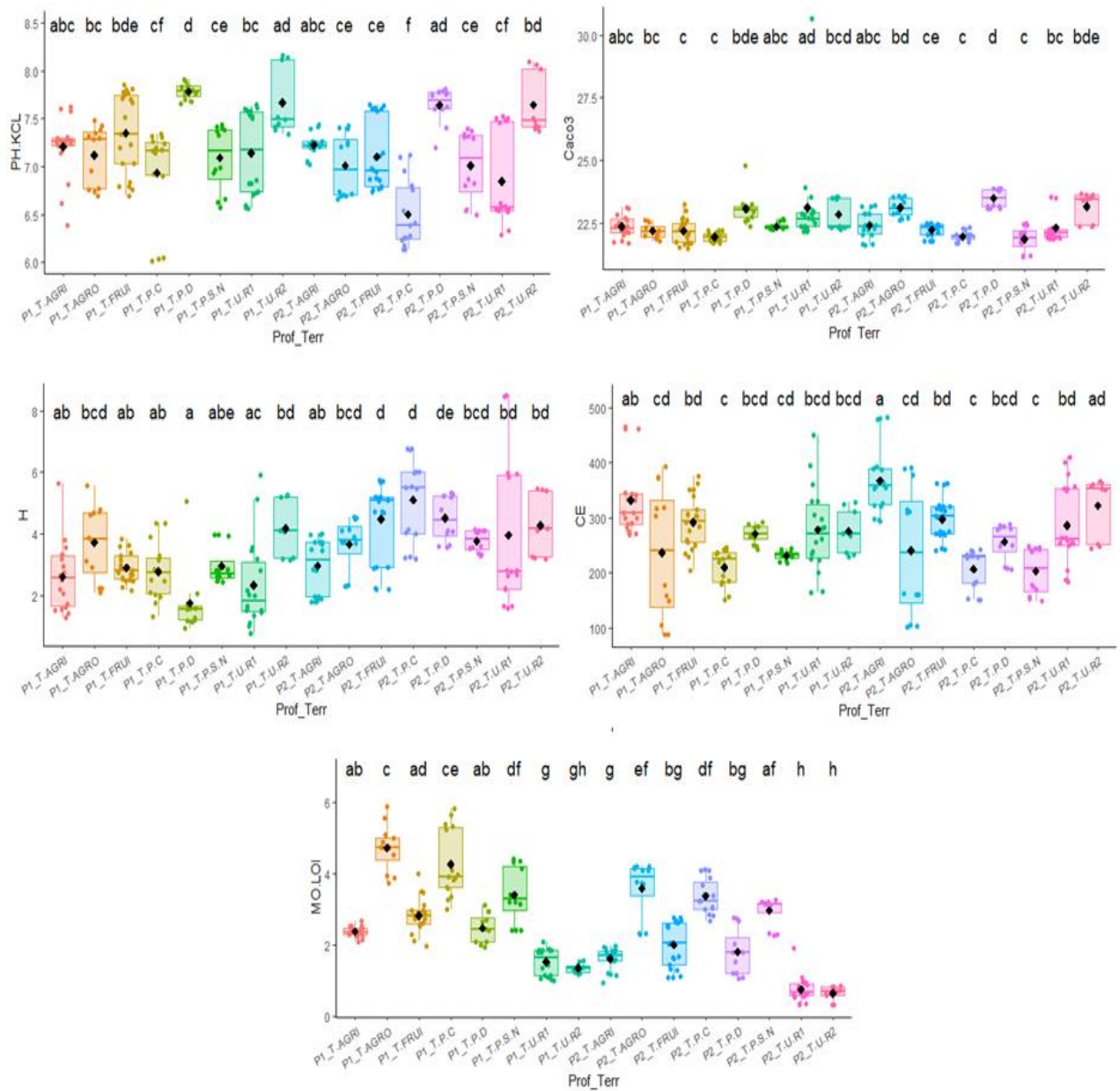


Figure 38. Résultats de l'analyse post-hoc de Tukey des paramètres physico-chimiques selon les modes d'occupation des sols et la profondeur.

L'analyse des variances a été renforcé par un test Tukey dont les résultats sont illustrés les figures 38 et 39. Ces figures montrent clairement les effets des facteurs terrain, profondeur et de leur interaction sur les paramètres physico-chimiques du sol.

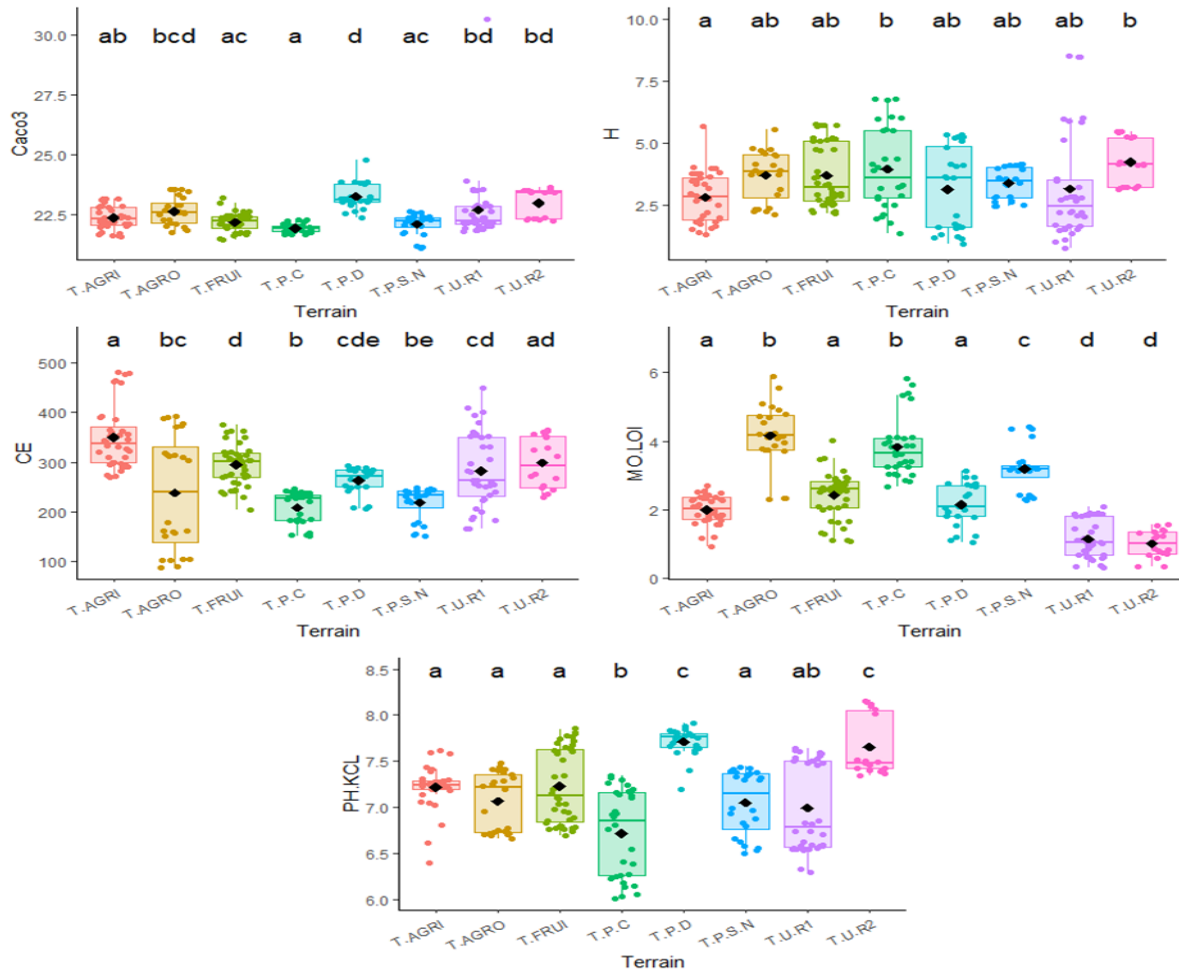


Figure 39. Résultats du test de Résultats du test de Tukey sur les paramètres physico-chimiques selon le mode d'occupation des sols.

- **Calcaire total (CaCO₃):**

- Les terrains urbains (T.U.R1 et T.U.R2) ont des valeurs nettement plus élevées que les autres terrains, comme le montre le **lettre "b"** dans la figure. Cela indique que le contenu en calcaire est significativement plus élevé dans les sols urbains.

- **Humidité hygroscopique (H):**

- Les terrains agroforestiers (T. AGRO) et les vergers (T. FRUI), pastoraux conservés ont des niveaux d'humidité plus important (marqués par les lettres **"a"**

et "ab"), tandis que les terrains urbains (T.U.R1 et T.U.R2) présentent les valeurs les plus faibles (marquées par "b"). Ces différences sont significatives.

- **Conductivité électrique (CE):**

- Les terres agricoles (T. AGRI) ont des valeurs élevées de CE, avec des différences significatives entre les terrains (indiquées par des lettres différentes ("a")) ce qui montre que la CE est plus élevée dans ce mode d'occupation de sol par rapport aux autres. Cela révèle l'impact des pratiques agricoles et de la gestion du sol sur la concentration des sels solubles.

- **Matière organique du sol (MO) :**

- Les terres agroforestiers et pastoraux conservés (T. AGRO, T.P.C) ont des niveaux plus élevés de MO, comme le montrent les lettres "a" et "b". En revanche, les terrains urbains (T.U.R1 et T.U.R2) ont des niveaux plus faibles de matière organique (marqués par "b"). Cela relève le rôle des apports organique provient du couvert végétal sur l'accumulations de la MO.

- **PH.KCL:**

- Le pH KCl varie également selon le terrain, avec des différences significatives, surtout entre les terrains T. AGRI et T.P.D (marqués par "a" et "b").

4.3.3. Analyse de variance (ANOVA) des fractions granulométriques du sol :

Les résultats de la variance (ANOVA), l'analyse des variances a été renforcée par un test Tukey dont les résultats sont illustrés dans la figure 40. Ces figures montrent clairement les effets des facteurs terrain sur les paramètres granulométriques du sol. Les résultats de l'ANOVA pour ces composants sont présentés dans le tableau 08. Montrent clairement les effets de facteur terrain sur les paramètres granulométriques du sol.

Les résultats de l'ANOVA pour les paramètres granulométriques (argile, limon, sable fin, sable grossier) ont montré des différences significatives entre les échantillons de sol provenant de différents modes d'occupation des sols. En particulier, les sols agroforestiers et pastoraux conservés ont montré des valeurs plus élevées en argile et en sable fin, tandis que les terrains urbains (T.U.R1 et T.U.R2) ont montré des valeurs plus faibles d'argile. Les différences de limon sont particulièrement marquées entre les terrains pastoraux et les terrains urbains, les terrains agricoles.

Les terrains pastoraux (T.P.C et T.P.D) présentent des valeurs intermédiaires. Aucune variations significatives pour le sable grossier entre les différents modes d'occupation du sol

ont été marqué. Le sable fin variées modérément entre les différents modes d'occupation des sols.

Tableau 10. Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) des fractions granulométriques selon le mode d'occupation des sols.

Eléments	ddl = 7		
	F value	P value	Obs.
Argile	10.446	9.331e-07	***
Limon	4.221	0.002131	**
Sable fin	7.0359	4.207e-05	***
Sable grossier	2.22	0.05873	ns

NB : * ($P \leq 0,05$), ** ($P \leq 0,01$), *** ($P \leq 0,001$), ns ($P > 0,05$)

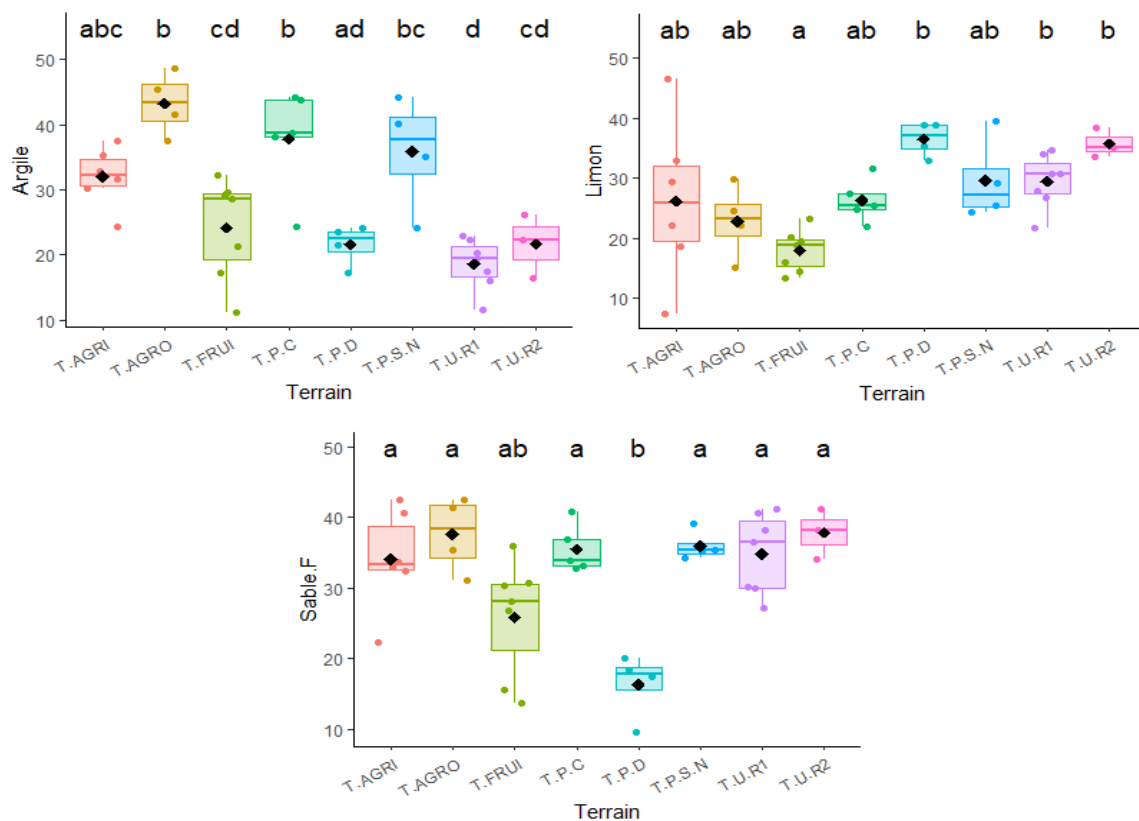


Figure 40. Résultats du test de Tukey pour les fractions granulométriques selon le mode d'occupation des sols.

Conclusion :

Les résultats du test de Tukey révèlent les variations significatives des fractions granulométriques (argile, limon, sable fin, sable grossier) en fonction du type de terrain, ce qui a des implications écologiques importantes pour la gestion des sols. Les terrains agroforestiers et pastoraux conservés présentent les niveaux les plus élevés d'argile, ce qui est bénéfique pour la rétention d'eau et la fertilité du sol. L'argile joue également un rôle essentiel dans l'amélioration de la qualité du sol, traduisant une meilleure stabilité structurale liée aux fractions fines et aux apports organiques provenant du couvert végétal.

Les terrains urbains, avec des niveaux plus faibles d'argile, reflètent fortement l'influence des activités humaines, ce qui entraîne une dégradation de la qualité physique des milieux urbains, caractérisée par une diminution des particules fines ainsi qu'une compaction accrue. Le limon varie modérément entre les différents modes d'occupation des sols, traduisant l'effet des pratiques de gestion. Le sable fin varie également modérément entre les différents modes d'occupation des sols, ce qui reflète des processus d'érosion ou de désagrégation mécanique liés à l'usage du sol.

Les résultats ont montré en général l'effet de l'occupation du sol sur les fractions granulométriques, qui jouent un rôle important dans la stabilité structurale et conduisent la qualité physique du sol. Nos résultats sont cohérents avec la majorité des études affirmant une variation significative dans la distribution des classes de texture avec les pratiques de gestion et les modes d'occupation des sols, les terrains agroforestiers et pastoraux conservés, avec leurs caractéristiques granulométriques favorisant une meilleure qualité du sol, sont plus propices à soutenir une biodiversité riche et une production végétale durable. Ces terrains peuvent également jouer un rôle clé dans la gestion et la conservation des sols.

De la même manière, les études de (Chemedda et al., 2017 ; Regasa, 2023) ont indiqué que la variation de la texture du sol selon le mode d'occupation des sols suggère que l'impact de l'occupation des sols sur les propriétés du sol résulte de l'effet des pratiques de gestion et de l'utilisation des terres.

4.4. Corrélations :

4.4.1. Corrélation de Pearson entre les paramètres physico-chimique du sol :

Les résultats de la corrélation de Pearson (des dépendances des variables) sont présentés dans la figure 41.

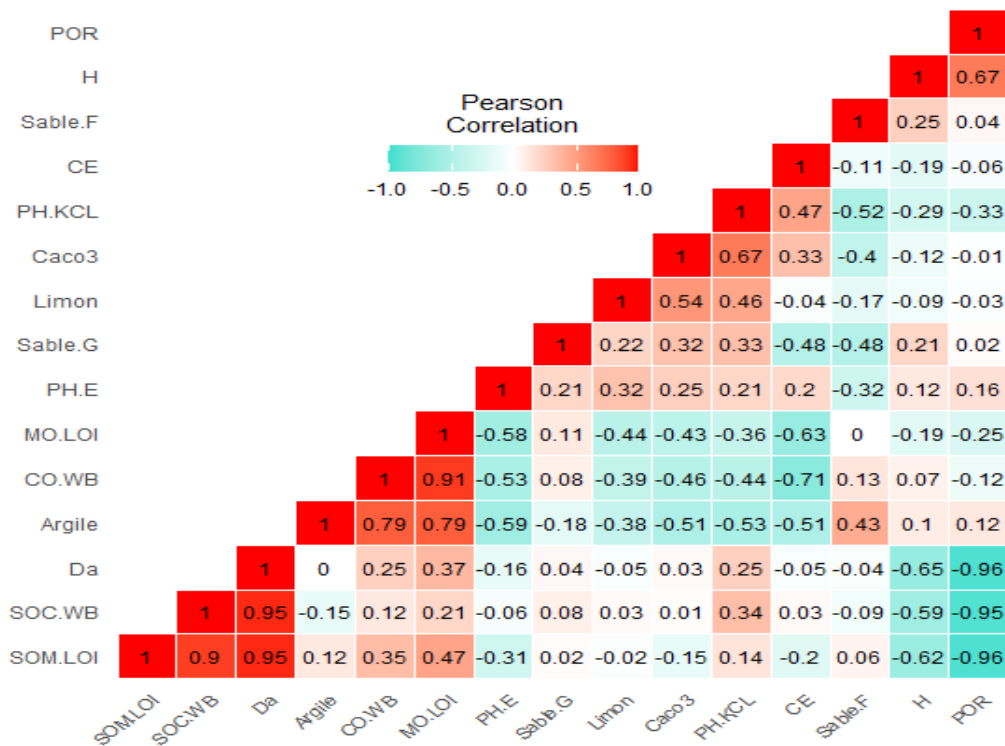


Figure 41. Corrélation de Pearson entre les paramètres physico-chimiques du sol.

L'analyse de corrélation de Pearson révèle des relations significatives entre les paramètres physico-chimiques du sol.

Il existe une corrélation positive significative entre le COS et le pH eau ($P \leq 0,01$; $r = 0,6984$). Cette relation peut s'expliquer par le rôle du COS dans l'amélioration de la capacité tampon du sol, contribuant ainsi à limiter les variations du pH.

Il y a une corrélation positive forte entre le COS et le CaCO_3 ($p \leq 0,01$; $r = 0,6817$). Cela pourrait indiquer que le calcaire renforce la stabilité structurelle du sol, contribuant ainsi au maintien de la MOS.

Une forte corrélation positive entre le COS et l'humidité hygroscopique (H) ($p \leq 0,01$; $r = 0,7233$). Les sols avec plus de MOS tendent à retenir plus d'humidité.

Une corrélation positive ($p \leq 0,05$; $r = 0,5457$) entre le pH eau et le CaCO_3 , les sols riches en calcaire tendent à avoir un pH plus élevé (alcalin).

Une corrélation positive entre le pH eau et l'humidité hygroscopique ($p \leq 0,01$; $r = 0,6724$), ce qui suggère que des sols avec un pH plus élevé (généralement plus alcalins) ont également une plus grande capacité à retenir l'humidité.

Une forte corrélation positive a été observée entre la MOS et le COS ($p \leq 0,01$; $r = 0,7672$). Cela indique que les sols riches en MOS présentent également des teneurs élevées en COS, ce dernier constituant le principal élément de la MOS, et jouant un rôle essentiel dans la structure et la fertilité du sol. Plus la MOS est abondante, plus l'accumulation de carbone organique dans le sol est importante.

Une forte corrélation positive a été observée entre le stock de COS et la MOS ($P \leq 0,01$; $r = 0,7499$). Cela souligne l'importance du COS dans le maintien de la structure et de la fertilité du sol.

Une corrélation positive entre le stock de COS et la porosité du sol ($p \leq 0,01$; $r = 0,6757$). Cela indique que les sols riches en COS présentent généralement une meilleure structure, avec une porosité plus élevée, ce qui favorise la rétention de l'eau et la circulation de l'air.

Une corrélation positive modérée entre le stock de MOS et la porosité du sol ($p \leq 0,05$; $r = 0,5438$). Cela confirme que la matière organique améliore la structure du sol, augmentant sa capacité à aérer et à retenir l'humidité.

Une corrélation négative entre le COS et la Da ($p \leq 0,001$, $r = - 0,96$). Plus le sol accumule le COS plus la densité du sol est diminué ce qui est augmenté la stabilité structurale du sol.

Une corrélation négative entre la MOS et la Da ($p \leq 0,001$, $r = - 0,90$). Cela indique que les sols riches en matière organique présentent généralement une meilleure stabilité structurale et une porosité plus élevée.

Une corrélation négative entre le CO et le pH KCL. ($P \leq 0,001$, $r = - 0,52$). Cela est dû au fait que la MO, en raison de son caractère acide, retient plus de protons (H^+) sur le complexe adsorbant.

Une corrélation positive forte entre l'argile et le COS ($p \leq 0,001$; $r = 0,7381$). Les sols argileux retiennent mieux la stabilité de la MOS, ce qui permet une meilleure accumulation de COS.

Une très forte corrélation positive a été observée entre la teneur en argile et le stock de carbone organique du sol (COS) ($p \leq 0,001$; $r = 0,9075$). Cela suggère que les sols plus argileux présentent une plus grande capacité de stabilisation et de stockage du carbone, ce qui peut contribuer à leur fertilité et à leur résilience.

Une corrélation positive modérée a été observée entre la teneur en limon et le COS ($p \leq 0,01$; $r = 0,6317$). Cela suggère que les sols plus riches en limon présentent généralement des teneurs plus élevées en carbone organique, ce qui peut contribuer à une meilleure qualité du sol.

Une corrélation positive a été observée entre la teneur en limon et l'humidité hygroscopique ($p \leq 0,01$; $r = 0,6226$). Cela suggère que les sols plus riches en limon présentent une meilleure capacité de rétention en eau.

Conclusion :

Les COS et MOS montrent une corrélation négative avec la Da. Ces résultats montrent que l'accumulation de MO améliore la stabilité structurale du sol. Une teneur faible en MOS conduit à une compaction du sol. Une relation forte observée entre les paramètres physico-chimiques (notamment le COS, la MOS) et les éléments granulométriques (argile, limon, sable fin) montrent que la texture du sol joue un rôle crucial dans le maintien et la stabilité du COS et la capacité du sol à retenir les nutriments et l'eau, ce qui influence directement la qualité du sol. Les sols riches en argile et limon présentent également des niveaux élevés de MOS et de COS et sont particulièrement fertiles et capables de soutenir une bonne qualité du sol. Donc on a souligné l'influence de la texture du sol sur les propriétés du sol.

4.5. Analyse multivariée :

4.5.1. Analyse en composantes principales (ACP) des propriétés du sol :

Les résultats de l'ACP sont illustrés dans la figure 42. Cette analyse a permis de réduire la dimensionnalité des données tout en conservant une large part de la variance. L'ACP a expliqué 78,5 % de la variance totale avec les axes principaux Dim1 (37,8%), Dim 2 (18,2%), Dim 3 (13,3%), et Dim 4 (9,2%). Ces axes représentent les principales sources de variation des paramètres étudiés et permettent d'interpréter les relations complexes entre les variables en réduisant la complexité de l'analyse. L'interprétation des relations entre les paramètres révèle des associations intéressantes entre les propriétés du sol, sa texture et ses propriétés. Les relations observées dans cette ACP se manifestent à la fois sous forme de corrélations positives et négatives, mettant en lumière comment ces propriétés du sol interagissent entre elles.

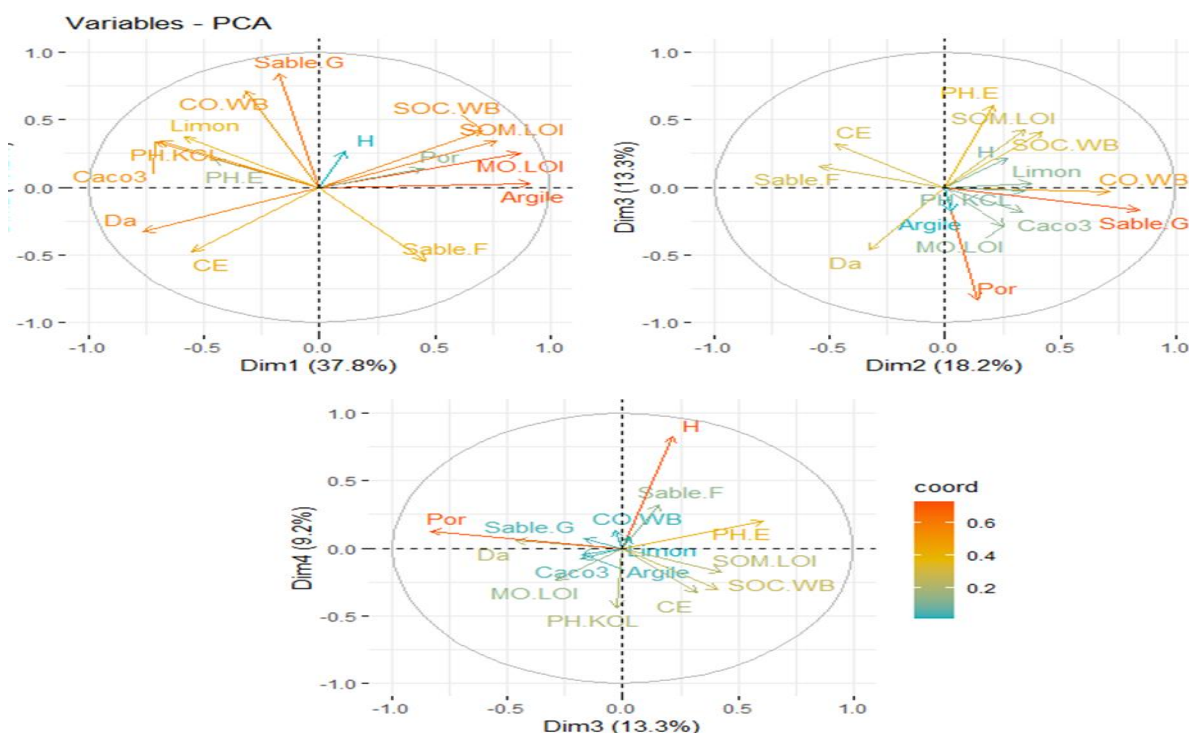


Figure 42. Graphique des variables de l'analyse en composantes principales (ACP) montrant les contributions des paramètres physico-chimiques et granulométriques du sol.

Le COS et la MOS sont étroitement liés à l'argile. Cette relation positive indique que les sols plus riches en MO ont tendance à être plus argileux, ce qui est typique des sols qui favorisent l'accumulation de carbone. Les sols argileux retiennent mieux l'eau et les nutriments, ce qui favorise leur fertilité et leur capacité à maintenir des conditions stables (porosité élevée). Le sable est en opposition avec l'argile indiquant que les sols plus souvent sableux ont une capacité réduite de rétention de l'eau (la porosité diminuée), ce qui peut limiter leur fertilité et rendre leur gestion plus complexe.

Certaines corrélations négatives sont observées lorsque des paramètres apparaissent dans des quartiles opposés (Q1-Q3, Q2-Q4), ce qui révèle des relations antagonistes entre certaines caractéristiques du sol. Par exemple, sable grossier dans Q4 montre une corrélation négative avec (COS et MOS) (dans Q1), ce qui suggère que les sols riches en sable grossier ont une capacité réduite à stocker du CO et de la MO. Cela peut être expliqué par la structure lâche du sable grossier, qui ne favorise pas une bonne rétention des nutriments et de l'humidité, limitant ainsi la fertilité du sol.

Le CaCO_3 et le pH KCl (Q4) présentent des relations négatives avec le sable et la porosité (Q2).

Les sols à forte teneur en calcaire ont tendance à être plus alcalins et moins poreux.

Une relation antagoniste entre la MO et la Da : Lorsque la teneur en MOS est élevée, la densité du sol tend à diminuer, rendant ainsi la structure défavorable à l'accumulation de MO.

Conclusion :

Ces résultats indiquent que les sols dominés par l'argile, le limon et la MO montrent des relations positives entre eux, indiquant que ces sols ont une grande capacité à retenir l'eau et les nutriments. Ces sols sont généralement plus fertiles et capables de soutenir une meilleure qualité du sol. À l'opposé, les sols riches en sable présentent une faible capacité à maintenir la MO. Une relation antagoniste entre la MOS et Da, lorsque la MOS augmente la Da diminue. Une relation antagoniste entre le CaCO_3 et Le PH KCL (Q4), montrent des relations négatives avec le sable et la porosité (Q2), Par conséquent, les sols qui contiennent plus de calcaire favorisent l'alcalinité et sont moins poreux. Dans ces types de sols, une gestion efficace est cruciale pour éviter les pertes et maintenir la qualité des sols.

4.5.2. Analyse en composantes principales ACP - Indices de terrain :

Le graphique biplot des indices de terrain (figure 43) permet d'observer de manière détaillée les relations écologiques entre les propriétés physico-chimiques du sol en fonction des différents modes d'occupation du sol.

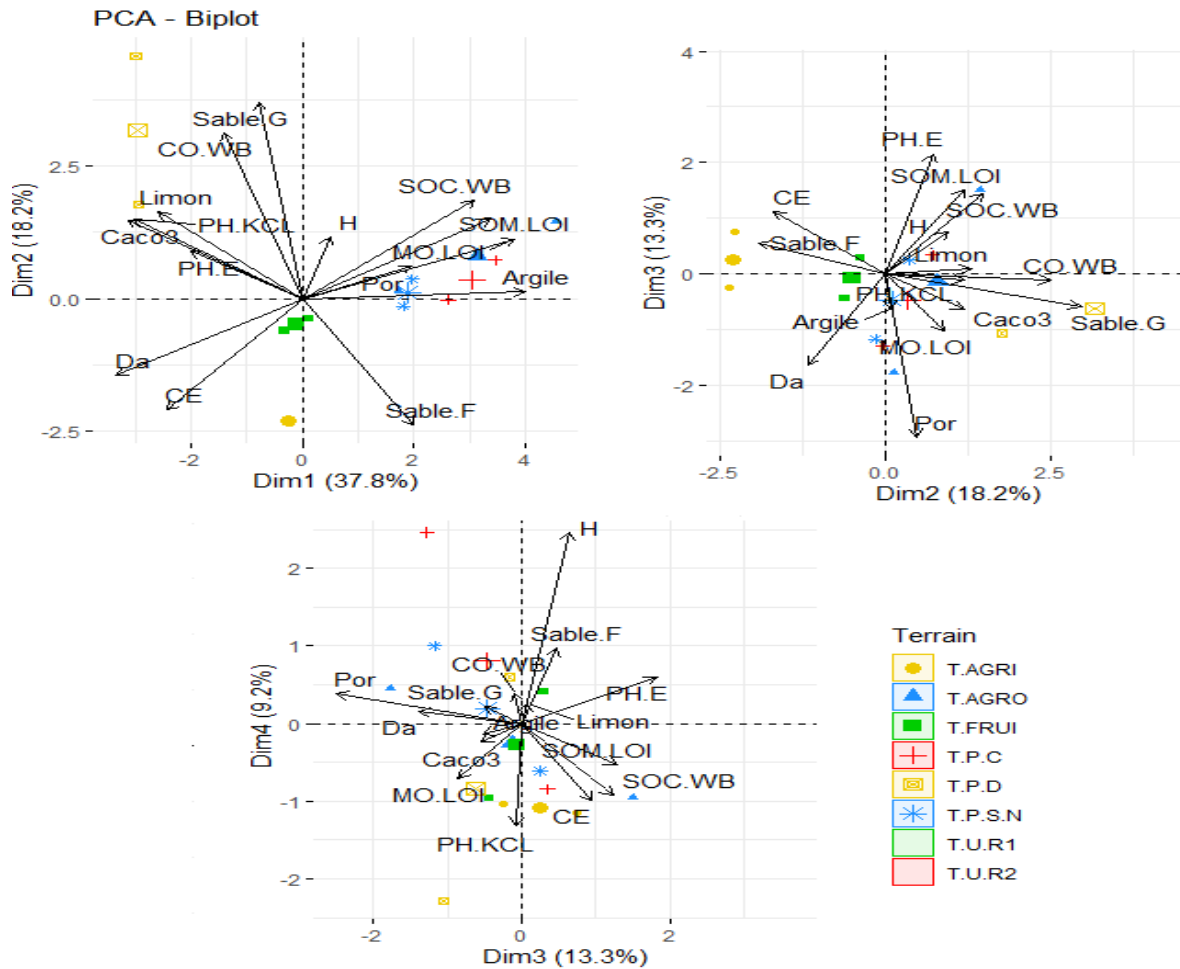


Figure 43. Biplot de l'analyse en composantes principales (ACP) montrant la distribution des paramètres physico-chimiques en fonction du mode d'occupation des sols. (La couleur noire représente les propriétés physico-chimiques du sol et les points colorés représentant les différents types d'occupation du sol).

L'ACP met en évidence la présence de gradients majeurs structurant les sols étudiés. L'axe 1, expliquant 37,8 % de la variance, oppose des sols calcaires et alcalins à des sols plus riches en matière organique, en argile et en porosité. L'axe 2, expliquant 18,2 % de la variance.

Les sols agroforestiers, pastoraux conservés, et parcours semi-naturels sont proches les uns des autres sur le graphique sont projetés positivement à l'axe 1 (Dim1 37,8 %), ce qui reflète une relation positive entre ces types de sols et des paramètres clés tels que (COS, MOS). Ces sols sont généralement riches en MO, ce qui leur permet de maintenir une structure de sol favorable, ainsi que leur capacité à stocker du CO réduit les émissions de gaz à effet de serre et contribue

à la séquestration du carbone. Les sols agricoles présentent des caractéristiques distinctes en raison de leur utilisation intensive et de leur conversion. Ils se caractérisent par une teneur modérée en MOS et une porosité réduite, ce qui limite leur capacité de rétention en eau par rapport aux sols agroforestiers et pastoraux conservés. Les terrains urbains sont caractérisés par une faible teneur en MOS et une forte compaction, liée à une densité apparente élevée, et sont projetés sur l'axe Dim3 (13,3 %). Les vergers sont plutôt associés à la matière organique, mais avec une variabilité modérée. Les parcours sont liés à la densité apparente et au carbonate de calcium, traduisant une diminution de la matière organique et une dégradation de la structure du sol.

4.5.3. L'Analyse en composantes principales ACP - Indices de terrain – profondeur :

La figure 44 permet d'examiner l'influence de la profondeur sur les relations entre les différents paramètres du sol. Les deux couches étudiées, (jaune de 0-5cm) et (bleu de 0-30cm), montrent des variations distinctes dans les caractéristiques physico-chimiques-la profondeur.



Figure 44. Biplot de l'analyse en composantes principales (ACP) montrant la distribution des paramètres physico-chimiques en fonction d'occupation du sol.

La zone jaune du graphique représenté principalement la couche supérieure de (0-5cm) et se caractérise par des associations avec des paramètres tels que COS, MOS et l'argile. Cette association indique que les sols de la couche superficielle du sol, sont riches en MO et présentent une texture argileuse favorable à la rétention et l'accumulation de la MO. Sont également liés à des paramètres comme limon et sable fin, ce qui suggère une texture qui permet une certaine aération et une meilleure gestion de l'eau.

La couche plus profonde du sol (zone bleue, 0-30cm), présente des relations dominantes avec des paramètres comme : le pH eau, sable grossier, CaCO₃, et sable fin. Cela suggère que les sols de la couche (0-30cm) sont plus compacts et souvent riches en calcaire, ce qui peut affecter leur réactivité chimique et leur capacité à maintenir une bonne structure. Cela traduit l'influence sur

l'accumulation de la MO. Ainsi que le pH KCL et CaCO₃, indique que les sols à ce niveau sont fortement liés aux propriétés chimiques associées au matériau parental.

Conclusion :

Les résultats confirment l'influence du facteur profondeur sur les propriétés des sols. L'alignement des paramètres étudiés (COS, MOS) dans la couche superficielle (0–5 cm) montre leur forte association avec des sols riches en argile, ce qui favorise la protection physique de la MOS. La couche plus profonde (0–30 cm) est davantage associée aux fractions sableuses (sable fin et sable grossier), ainsi qu'au pH de l'eau et au CaCO₃. Cela reflète l'influence du matériau parental et de la minéralogie sur les caractéristiques chimiques du sol.

4.5.4. Clustering hiérarchique – dendrogramme :

Le dendrogramme (figure 45) permet de visualiser comment les différents modes d'occupation des sols sont regroupés selon leurs similarités. Chaque cluster regroupe les terrains qui partagent des caractéristiques physiques et chimiques similaires, ce qui nous permet d'interpréter les relations écologiques entre les types de terrain.

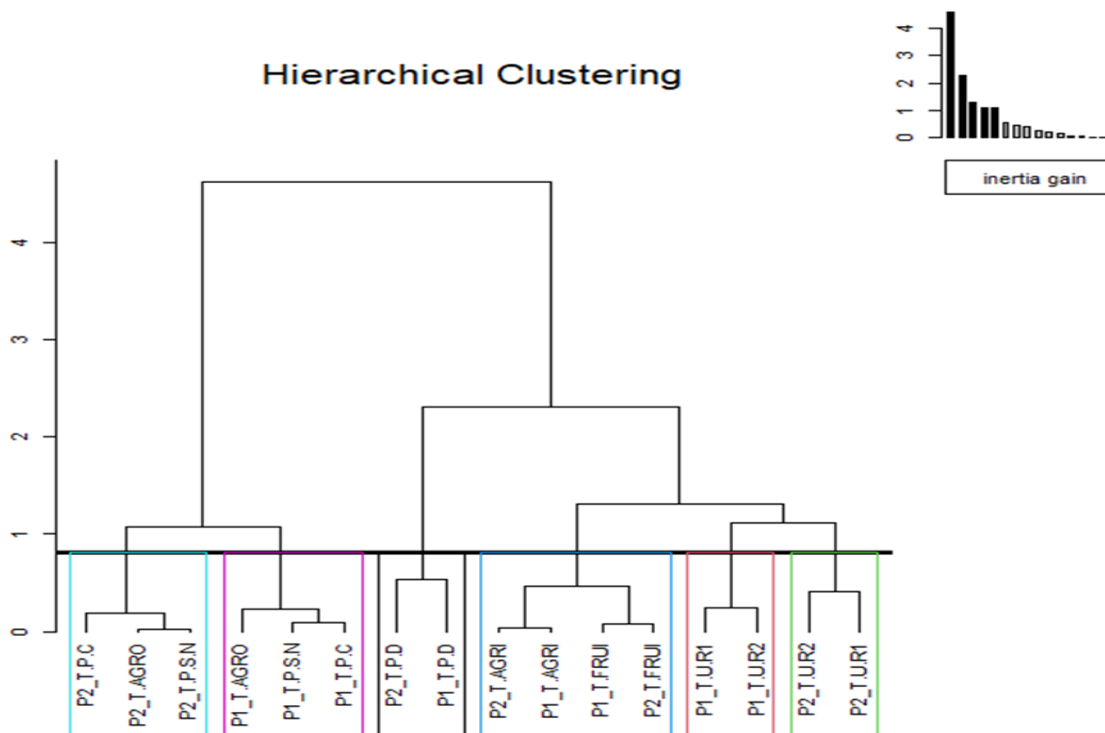


Figure 45. Dendrogramme du clustering hiérarchique.

Cluster 1 : Ce groupe regroupe les sols agroforestiers et pastoraux conservés, ainsi que les parcours semi-naturels. Ces terrains sont généralement riches en MO. Cette association est cohérente avec les résultats de l'ACP, qui ont montré que ces modes d'occupation des sols étaient associés à des sols de meilleure qualité.

Cluster 2 : Pastoral dégradé (T.P.D), forme un cluster distinct, suggérant que ce type de terrain présente des caractéristiques différentes, souvent en raison de la compaction du sol et de pratiques de pâturage intensif, une réduction de la MO et sont souvent moins fertiles. Ce cluster montre clairement l'impact des pratiques humaines sur la dégradation des sols.

Cluster 3 : Les sols agricole (T. AGRI), les vergers (T. FRUI) : forment un autre groupe distinct, ce qui suggère des propriétés proches telle que : CaCO_3 , pH, MO. Ces terrains ont des besoins spécifiques en matière de gestion.

Cluster 4 : Les terrains urbains (T.U.R1 et T.U.R2) forment un cluster bien distinct, ce qui montre que les propriétés des sols urbains sont très différentes des autres types de terrain. Ces sols sont souvent marqués par une compaction accrue, Ce groupe est typique des zones urbaines où la gestion des sols est souvent perturbée par des constructions, des circulations et des activités humaines.

Lien avec l'ACP :

L'interprétation du dendrogramme confirme les relations observées dans l'analyse en ACP. Les sols agroforestiers et pastoraux conservés, ainsi que les parcours semi-naturels, sont associés à des sols riches à modérée en MO. À l'opposé, les terrains dégradés et urbains montrent des caractéristiques qui limitent leur qualité.

Cette classification permet de mieux comprendre l'impact des activités humaines sur les propriétés du sol. Les pratiques de gestion durable des sols, comme les systèmes agroforestiers et les pastoraux conservés, sont essentielles pour la santé des écosystèmes. À l'inverse, les terrains dégradés et urbains nécessitent une gestion plus complexe et des pratiques de restauration pour améliorer leur qualité.

La figure en 3D du clustering hiérarchique complète l'analyse du dendrogramme en offrant une visualisation claire de la distribution des types de terrain selon leurs caractéristiques physico-chimiques.

Les clusters identifiés dans le dendrogramme sont également visibles dans cette représentation 3D, où les systèmes agroforestiers, pastoraux conservés et parcours semi-naturels (cluster 1) se regroupent étroitement, confirmant leur similitude en termes de fertilité et de structure du sol. À l'opposé, les terrains urbains et pastoraux dégradés (clusters 3 et 2) apparaissent clairement séparés, ce qui indique des propriétés plus modifiées et une fertilité moindre. Cette visualisation

Clusters et relations avec les terrains :

Cluster 1 : Ce cluster est situé en haut à gauche de la carte, indiquant qu'il est distinctement séparé des autres types de terrains. Les terrains pastoraux dégradés montrent des propriétés plus pauvres en termes de qualité, souvent associées à des pratiques de pâturage intensif et à une compaction du sol. Ce cluster se trouve loin des autres groupes, ce qui reflète bien l'impact négatif des activités humaines sur la qualité des sols dans ces zones.

Cluster 2 : Le cluster correspondant aux terrains urbains (T.U.R1 et T.U.R2) est clairement visible dans la partie inférieure droite de la carte. Les sols urbains, avec leurs propriétés modifiées (compaction, faible teneur en MO), montrent une répartition distincte des autres types de terrain. Cette séparation confirme l'impact des activités humaines sur la structure du sol et la réduction de sa qualité.

Cluster 3 : Les terrains agricoles et vergers (T. AGRI et T. FRUI) se retrouvent dans une zone centrale, montrant qu'ils partagent des caractéristiques modérément communes. Cependant, ils sont situés plus près des terrains urbains que des sols agroforestiers ou pastoraux conservés, ce qui peut indiquer que ces sols sont influencés par des pratiques agricoles intensives et nécessitent un amendement constant pour maintenir leur qualité.

Cluster 4 : Ce groupe, précédemment identifié dans le dendrogramme et la figure en 3D, est clairement séparé et formé de terres agroforestières et pastorales (T.P.C, T.P.S.N). Ces terrains sont riches en CO, leurs propriétés physico- chimiques favorisent un environnement propice et une gestion durable des ressources naturelles.

Relation de l'ACP et les autres analyses :

La carte des facteurs renforce les conclusions tirées des résultats de l'ACP et du clustering hiérarchique. Par exemple, les terrains agroforestiers et pastoraux conservés (cluster 4), indiquant qu'ils favorisent une qualité élevée et une fertilité stable. Tandis que les terrains urbains (cluster 2) sont liés à des paramètres comme la compaction confirmant la dégradation des sols urbains.

Conclusion :

La figure 46 montre comment les terrains se regroupent selon leurs propriétés physico-chimiques, tout en illustrant l'impact des pratiques humaines.

Les terrains agroforestiers et pastoraux conservés se distinguent par leur capacité à soutenir des écosystèmes durables, tandis que les terrains urbains et pastoraux dégradés nécessitent une gestion améliorée pour préserver leur qualité écologique. Cette analyse visuelle aide à mieux comprendre les relations complexes entre les paramètres du sol et les types de terrain, renforçant ainsi la nécessité de pratiques de gestion durable.

Discussion Gènèrale

Discussion générale

4.6. Discussion générale :

Cette section synthétise les résultats obtenus dans le chapitre 4, en fournissant des réponses aux questions liées aux objectifs de la thèse.

Nos résultats montrent que l'épaisseur du sol constitue un indicateur important pour évaluer la réponse des sols aux changements environnementaux. La couche superficielle de (0–5 cm) réagit rapidement aux modifications climatiques et aux pratiques de gestion, reflétant les effets récents. En revanche, la couche plus profonde (0–30 cm) enregistre des impacts plus lents, offrant un historique concernant l'effet du changement climatique sur la qualité du sol à long terme.

L'analyse climatique a révélé une variabilité thermique marquée, avec des températures maximales moyennes estivales comprises entre 29 et 32 °C et des minimales hivernales avoisinant 8 à 9 °C. Cette amplitude influence directement la dynamique de la MOS : la hausse des températures accélère la décomposition du CO en surface, expliquant la sensibilité accrue de la couche de 0–5 cm aux fluctuations actuelles. À l'inverse, la couche de 0–30 cm réagit plus lentement, affectant les processus biologiques et chimiques liés au stockage et au renouvellement du carbone.

La quantification des teneurs et des stocks de COS à deux profondeurs met en évidence l'influence du climat, des modes d'occupation des sols et des pratiques de gestion sur la dynamique organique des sols. Dans un contexte de forte vulnérabilité régionale, ces résultats soulignent la nécessité d'adopter des pratiques de gestion adaptées, capables de limiter la dégradation des sols tout en renforçant leur rôle dans la séquestration du carbone et la préservation de la qualité du sol.

L'analyse des propriétés des sols selon différents mode d'occupation des sols a permis de mieux comprendre cette dynamique. Les résultats confirment que la couche supérieure est la partie la plus dynamique et la plus vulnérable aux changements climatiques. En effet, cette couche répond rapidement aux apports organiques en surface (litière, résidus de culture) qui favorisent le renouvellement du COS, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique. Ceci est en accord avec de nombreux travaux de (Atchada et Akplo, 2022 ; Bai et Zhou, 2020 ; Brahim et al., 2014 ; Benslama et al.,2024 ; Dahmani et al.,2025), qui ont montré que

l'utilisation des terres, le type de sol, ainsi que la profondeur influencent significativement la dynamique du SOC stocké.

De plus, les propriétés physico-chimiques sont des facteurs importants qui affectent les stocks organiques. Nos résultats ont révélé que la moyenne maximale des stocks de COS se trouve dans la couche supérieure (0-5 cm) pour tous les modes d'occupation des sols, suivant cet ordre : terres agroforestières > terres pastorales > verges > terres cultivées > terres urbaines. Ces résultats sont en accord avec la découverte de (Olujobi et al., 2022) qui a rapporté que le niveau le plus élevé de teneurs en MOS et COS obtenu dans la couche supérieure par rapport aux couches plus profondes, ce qui est lié à l'apport plus élevé provenant de la décomposition des feuilles (litière), en particulier dans les terres arables et agroforestières.

En revanche, les terres cultivées et les pâturages dégradés présentent les teneurs de SOC les plus faibles dans la couche 0–30 cm. Cette diminution peut être expliquée par le surpâturage et certaines pratiques de gestion qui favorisent une forte activité microbienne et accélèrent la minéralisation, réduisant ainsi l'accumulation de carbone (Soussana et al., 2004). D'autres facteurs tels que l'érosion, le lessivage et la dégradation physique (croûte de battance, compaction) contribuent également à ce déclin (Ndiaye et al., 2014 ; Pei et al., 2008).

Par ailleurs, une concentration décroissante de COS avec la profondeur a été observée dans tous les modes d'occupation des sols, confirmant les résultats de (Awoonor et al., 2022 ; Vandana et al., 2023 ; Rahman et al., 2021 ; Girma et al., 2023). Ces résultats pouvaient être attribués à plusieurs facteurs, notamment la variable climatique, le couvert végétal, la disponibilité des nutriments, l'utilisation des terres et les pratiques de gestion, la diversité fonctionnelle et l'activité microbienne des sols fournissent un changement dans la concentration de COS avec une diminution ou une augmentation (Sheikh et al., 2009 ; Post et Kwon, 2000 ; Albaladejo et al., 2013).

La détermination de la Da a montré une différence notable entre les terrains naturels et cultivés. Les terrains urbains présentent une forte Da, ce qui traduit une compaction du sol liée à la faible teneur en MOS. Ces résultats concordent avec ceux de (Benslama et al., 2023 ; Navarro-Pedreno et al., 2024 ; Dahmani et al., 2025), qui indiquent qu'une valeur élevée reflète le compactage des sols. À l'inverse, les terrains agroforestiers et pastoraux conservés présentent des valeurs plus faibles, ce qui reflète le rôle du couvert végétal. En effet, l'apport permanent de MOS via la litière contribue fortement à l'évolution du sol. Les terrains agroforestiers, considérés parmi les systèmes naturels les mieux régulés au monde, représentent des milieux équilibrés. Dans ce cas, l'influence combinée de la Da et de la MO de surface est déterminante.

La texture du sol a montré une variabilité entre les différents modes d'occupation des sols, avec une dominance de la fraction argileuse, ce qui favorise une meilleure protection physique de la MOS sous les terrains agroforestiers et pastoraux conservés. Plusieurs études ont mis en évidence les effets positifs de la teneur en argile sur l'augmentation du COS. Kibet et al. (2022) ont montré que la présence d'argile protège le COS de l'oxydation microbienne et contribue au maintien de la stabilité du carbone. De plus, Buruso et al. (2023) et Wavel et al. (2025) ont rapporté que les horizons de surface présentaient une teneur plus élevée en argile ainsi que des minéraux argileux tels que la smectite, ce qui a probablement limité la dégradation de la MOS et renforcé les capacités de stockage des nutriments et du COS.

Selon les différents modes d'occupation des sols, le pH mesuré varie généralement de neutre à légèrement alcalin. Cette évolution est également influencée par l'agriculture intensive et la conversion des milieux naturels. De façon similaire, Amusan et al. (2006) ont rapporté une diminution significative du pH sous cultures continues au Nigeria. Par ailleurs, des valeurs de pH plus élevées sont généralement observées en profondeur, conséquence de la lixiviation des cations basiques et de l'érosion liée aux pratiques agricoles (Kumar et al., 2012 ; Gebeyaw, 2019 ; Molla et al., 2021).

La CE dans les différents modes d'occupations des sols est moyenne avec un risque minimum de salinité, excepté pour les terres agricoles, selon les conclusions des études de (Benslama et al., 2022), la combinaison de facteurs géologiques dans la région méditerranéenne et de pratiques agricoles intensives a entraîné un niveau plus élevé de salinité.

Le calcaire total a été variée avec une différence moyenne pour la couche superficielle et tout le profil, les moyennes les plus élevées ont été observées sous les milieux urbains et les sols pastoraux dégradés. Cette répartition reflète l'influence de la lithologie régionale, ainsi que l'impact des activités humaines.

Dans la couche de (0-30cm) la porosité du sol est plus élevée sous les terrains agroforestiers et pastoraux conservés, ce qui est un indicateur important des apports récents de carbone d'origine végétale et des quantités provenant des débris lignocellulosiques et des matières décomposables issus des litières. Une faible porosité sous les terrains urbains ce qui limite la circulation de l'eau et d'air, liées au travail intensif du sol ce qui influence la minéralisation de la MOS.

Les résultats ont montré des teneurs plus importantes de l'humidité hygroscopique dans la couche supérieure que le plus profonds. Les teneurs plus élevées ont été enregistrées sous les terrains agroforestiers et pastoraux conservés. D'après (Fu et al., 2003 ; Lakehal et al., 2023) les

variabilités de l'humidité du sol sont dues aux variations dans la distribution des racines et aux propriétés physiques du sol, et influencer également par la profondeur.

L'analyse multivariée a mis en évidence les variabilités observées et les interactions entre les paramètres étudiés selon les modes d'occupation des sols, permettant de les classer selon leurs similarités.

Une corrélation négative est observée entre COS, MOS et la DA. L'accroissement de la MOS favorise donc la stabilité structurale, tandis qu'une faible teneur en MO conduit à une compaction du sol.

Une relation marquée relie également les paramètres physico-chimiques du sol (COS, MOS) et les constituants granulométriques (argile, limon, sable fin). Les sols argilo-limoneux présentent les teneurs en SOC les plus élevées, alors que les sols sableux affichent les valeurs les plus faibles.

Le pH aurait un effet sur le stockage organique dans la couche supérieure des sols et tout le profil, marquée par une augmentation importante dans un gradient de pH du sol allant de la neutralité à l'alcalinité et on a observé que les sols acides auraient en moyenne une capacité de stockage.

Le pH plus élevé des prairies peut s'expliquer par la préservation des cations basiques grâce à une couverture végétale permanente limitant le lessivage et l'érosion. À l'inverse, dans les sols cultivés, l'agriculture intensive, l'exportation des nutriments par les récoltes et l'usage répété d'engrais azotés favorisent la perte de bases et l'accumulation d'ions entraînant une diminution du pH (Mathewos et al., 2025)

Il semble, selon notre étude, que les concentrations élevées de carbonates de calcium ne favoriseraient pas la capture du CO dans les sols urbains. Des résultats similaires ont été rapportés par (Merabtene, 2022), confirmant que de fortes concentrations de carbonates de calcium ne favorisent pas la séquestration du CO dans les sols.

La classification hiérarchique a regroupé les terrains urbains par un cluster isolée, ce qui conforme leur état de dégradation. L'ensemble des résultats met en évidence que l'utilisation des terres est un élément crucial qui différencie la qualité des sols.

D'autres études ont démontré que la transformation des forêts naturelles en terres agricoles a entraîné une diminution importante de la MOS (Bounouara, 2018). De plus les facteurs naturels peuvent affecter la dégradation des terres, comme l'inclinaison et la sensibilité du sol à la déflation et à l'érosion hydrique, les incendies de forêt, les séismes, les inondations et la sécheresse. Cependant, ces facteurs peuvent être influencés directement ou indirectement par les activités humaines (Mahata et Sharma, 2021).

Il ressort que la nature d'utilisation des sols n'est pas le seul déterminant de la modification des propriétés physico-chimiques du sol. Cette influence est souvent amplifiée par le surpâturage et la fréquence des incendies, qui peuvent entraîner des différences significatives entre les valeurs médianes des paramètres chimiques selon les modes d'occupation des sols. Des recherches ont montré que le feu altère les acides organiques, provoquant une élévation significative du pH, bien que cet effet demeure limité dans les sols riches en carbonates (Meddour et al., 2013 ; Boubehziz et al., 2024 ; Agbeshie et al., 2022 ; Eldridge et al., 2023). Dans leur étude menée dans la même région, Dahmani et al. (2025) ont identifié de différences statistiquement notables concernant les paramètres physico-chimiques du sol dans les terres dégradées comme les pastoraux, surtout en termes de MOS. De même, Yitbarek et al. (2013) ont montré que les incendies de forêt entraînent une diminution des biomasses aériennes et affectent directement la couche superficielle du sol.

Conclusion et recommandations

Conclusion et recommandations

4.7. Conclusion et recommandations :

L'analyse de la problématique adoptée dans cette thèse nous a permis, dans la première partie, de réaliser une synthèse bibliographique qui se rapporte sur l'état de l'art sur l'impact du changement climatique sur les propriétés des sols dans la partie Nord-est de l'Algérie.

De ce fait, nous avons pu mettre en évidence une stratégie qui est basé sur l'évaluation des échantillons de sol en deux profondeurs de (0-5cm) et de (0-30cm) dans différents modes d'occupation des sols.

Ces études sont d'une importance cruciale lorsqu'il s'agit des stratégies de gestion durable des terres dans un contexte influencé par le changement climatique.

D'après les résultats obtenus, il existe une forte variabilité des paramètres physico-chimique des sols dans la région. Elles ont mis en évidence que plusieurs facteurs sont en mesure d'affecter : la couvert végétale, le mode d'usage, la profondeur. Cependant, l'occupation des sols et la profondeur apparaissent comme les principaux facteurs déterminants, influençant fortement les propriétés des sols en surface et en profondeur.

La caractérisation des sols de la région d'étude a mis en évidence trois principaux types de sols, dont la pédogenèse est fortement influencée par l'apport en matière organique. Dans cette région, les sols présentent généralement une couleur brun foncé à noire. Les types de sols dominants sont principalement les Luvisols (LV), les Fluvisols (FL) et les Calcisols (CL). La majorité d'entre eux s'est développée à partir de roches calcaires.

On constate que la couche supérieure du sol, notamment dans les milieux naturels tels que les systèmes agroforestiers et pastoraux conservé, contribue au maintien d'une bonne qualité des sols par rapport au couche plus profonds. La gestion durable de ces écosystèmes favorise l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol, tout en assurant une forte activité microbienne liées à la richesse de la couvert végétal, une meilleure rétention en eau, une stabilité chimique accrue ainsi qu'une minéralisation optimale de la MOS.

On a observé une différence notable concernant le stockage du COS selon les différents modes d'occupation des sols. Néanmoins, les sites présentant les plus grands stocks sont ceux où la diversité végétale est la plus élevée. Cela peut favoriser une augmentation de la MOS avec 23,10 t ha⁻¹ et 19,98 t ha⁻¹ dans les systèmes agroforestiers et pastorales conservé. La valeur minimale des stocks de COS a été notée sous les terrains urbains, par rapport à tous les modes d'occupation des sols, avec 8.89 t ha⁻¹. Cela signifie qu'il y a moins de décomposition de MOS

et une entrée limitée. En revanche, les sols sous culture et les vergers présentent des stocks respectifs de 14,51 t ha⁻¹ et 14,46 t ha⁻¹, ce qui peut être attribué aux amendements organiques favorisant l'accumulation du carbone dans le sol. Comme indiqué précédemment la MOS joue un rôle crucial de régulateur des propriétés du sol et de nombreux facteurs environnementaux influençant la productivité agricole, notamment dans les sols peu fertiles et modifiés. De plus, les propriétés du sol sont associées à l'accumulation de la MOS et évoluent rapidement lorsque cette dernière est incorporée ou retirée.

Les caractéristiques physico-chimiques du sol mettent en évidence le défi majeur que représente l'accroissement des activités humaines dans la région d'étude. Dans le contexte du changement climatique affectant le bassin méditerranéen et de la croissance démographique favorisant la conversion des terres, notamment des milieux naturels en terres pastorales, ces pressions entraînent une modification des propriétés des sols.

La quantité de COS a diminué de manière significative avec l'augmentation de la profondeur. Les teneurs les plus élevées en COS ont été observées dans la couche superficielle (0-5 cm) du sol.

La principale raison de cette distribution du COS en fonction de la profondeur est la forte teneur en COS observée en surface, due à l'accumulation de litière végétale, de racines, d'exsudats et d'autres apports organiques. Les couches plus profondes reçoivent moins d'apports directs de matière organique, ce qui entraîne des concentrations en carbone organique plus faibles par rapport à la couche superficielle.

Recommandations :

Enfin, nous soulignons que ce travail de recherche est un sujet très vaste. Son développement initial a abouti à une identification de plusieurs objectifs nécessitant un développement, une exploitation approfondie de tous les aspects essentiels. Nous ouvrons des perspectives de recherche très intéressantes sur plusieurs questions :

Etant donné la complexité du sol et les conditions difficiles des terrains, nous avons intégré les conclusions d'une revue de littérature ainsi que nos données issues d'essais. Ces données pourraient être utiles pour des recherches futures portant sur l'impact de l'usage des sols, les caractéristiques physico-chimiques du sol et la séquestration du carbone ainsi que le stockage du carbone, ce qui permettra une meilleure compréhension et une prévision de ce qui est nécessaire selon le type d'usage des terres. Par conséquent, les responsables politiques ainsi, les décideurs peuvent prédire les actions qui devront être prises pour protéger et améliorer le sol, favorisant l'accumulation de la MOS.

Par exemple :

- a) Pour limiter les différents facteurs contribuant à la dégradation des sols, il est nécessaire d'études interdisciplinaires impliquant des pratiques de gestion durable qui pourraient réduire la dégradation du sol. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à comprendre le rôle important du sol comme un puits organique. Augmenter le COS améliore la qualité du sol et favorise l'agriculture productivité.
- b) L'ensemble de données reflète l'état fragile de la zone d'étude, Il est nécessaire l'implication de l'initiative socio-économique pour une gestion durable. De manière spécifique, les terres les plus touchés sont ceux qui se trouvent en milieu urbaine. Il faut gérer ces zones pour améliorer leur qualité en suivant des stratégies similaires à celles appliquées dans l'agroforesterie et les, adaptées au contexte urbain. Mener des études pour recenser tous les incidents vécus par les habitants en milieu urbain. Ces sondages pourraient fournir une aide aux gestionnaires de la milieu urbain pour détecter les éléments influençant la qualité des sols et par conséquent, mettre en œuvre des actions appropriées.
- c) Les tests statistiques ont confirmé des différences dans les paramètres du sol entre les occupations des sols. Les recherches futures devraient explorer des paramètres physico-chimiques supplémentaires en termes de planification de la conservation pour assurer leur préservation à long terme.
- d) Construire un outil informatique basé sur une approche systémique, dont l'objectif est de modéliser l'ensemble des interactions et élargir les études pour toucher d'autres sites dans la région.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ABDULLATIF, Y., SOLIMAN, E., HAMMAD, S. A., EL-GHAMRY, A., MANSOUR, M. M. (2024).** Impact of carbon nanoparticles on aggregation and carbon sequestration under soil degradation—a review. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 15(4), 85-92.
- ABBAS, F., HAMMAD, H. M., ISHAQ, W., FAROOQUE, A. A., BAKHAT, H. F., ZIA, Z., CERDÀ, A. (2020).** A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. *Journal of environmental management*, 268, 110319.
- AGBESHIE, A. A., ABUGRE, S., ATTA-DARKWA, T., AWUAH R. (2022).** A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441.
- AGUILERA, E., DÍAZ-GAONA, C., GARCÍA-LAUREANO, R., REYES-PALOMO, C., GUZMÁN, G. I., ORTOLANI, L., SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, M., RODRÍGUEZ-ESTÉVEZ, V. (2020).** Agroecology for adaptation to climate change and resource depletion in the Mediterranean region. A review. *Agricultural Systems*. 181, 102-809.
- AGUILERAS, E., LASSALETTA, L., GATTINGER, A., GIMENO, B. S., (2013).** Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: a meta-analysis. *Agric.Ecosyst. Environ.*168, 25-36.
- AKPA, S.I.C., ODEH, I.O.A., BISHOP, T.F.A., HARTEMINK, A. E., AMAPU, I.Y. (2016).** Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in Nigeria. *Geoderma*.271, 202–215.
- ALBALADEJO, J., ORTIZ, R., GARCIA-FRANCO, N., NAVARRO, A. R., ALMAGRO, M., PINTADO, J. G., & MARTINEZ-MENA, M. (2013).** Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 265-277.
- ALLAOUA, S. (2019).** Education Environnementale et Conservation des Zones Humides à Intérêt Local et International. Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar Annaba.99.
- ALLEM, M. (2022).** Ecologie des zones humides de la wilaya d'Annaba Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar Annaba (Algérie). 120.
- AMANUEL, W., YIMER, F., KARLTUN, E. (2018).** Soil organic carbon variation in relation to land use changes: the case of Birr watershed, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*. 42, 1-11.

AMUSAN, A. A., SHITU, A. K., MAKINDE, W. O., OREWOLE, O. (2006). Assessment of changes in selected soil properties under different land use in Obafemi Awolowo University Community, Ile-Ife, Nigeria. *Electron J Environ Agric Food Chem*, 5, 1178-1184.

AOUISSI, H. A., PETRIŞOR, A. I., ABABSA, M., BOŞTENARU-DAN, M., TOURKI, M., BOUSLAMA, Z. (2021). Influence of land use on avian diversity in North African urban environments. *Land*, 10(4), 434.

ARROUAYS, D., BALESSENT, J., GERMON., J.C, JAYET., P.A, SOUSSANA., J.F, STENGEL, P.(2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertises scientifique collective. Rapport INRA. Paris : Institut national de la recherche agronomique (Inra), 332.

ATCHADA, C. C., & AKPLO, T. M. (2022). Variabilité du carbone dans les différentes fractions organiques du sol suivant les modes d'utilisation des terres en Afrique de l'Ouest. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 10(1), 1–9.

ATTOUI, B. (2009). Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région de Annaba El-Taref et identification des sites d'enfouissement de déchets thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar Annaba.

AWOONOR, J. K., ADIYAH, F. AND DOGBEY, B. F. (2022). Land use Change on Soil C and N Stocks in the Humid Savannah Agro-Ecological Zone of Ghana. *Journal of Environmental Protection*. 13(1), 32-68.

AWALE, R., EMESON, M. A., MACHADO, S. (2017). Soil organic carbon pools as early indicators for soil organic matter stock changes under different tillage practices in Inland Pacific Northwest. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 96.

BABUR, E., KARA, O., FATHI, R. A., SUSAM, Y. E., RIAZ, M., ARIF, M., & AKHTAR, K. (2021). Wattle fencing improved soil aggregate stability, organic carbon stocks and biochemical quality by restoring highly eroded mountain region soil. *Journal of Environmental Management*, 288, 112489.

BAI, Y., & ZHOU, Y. (2020). The main factors controlling spatial variability of soil organic carbon in a small karst watershed, Guizhou Province, China. *Geoderma*, 357, 113938.

BAIZE, D., & GIRARD, M.-C. (1995). Référentiel pédologique. Paris, France : INRA.

- BAIZE, D., & ROSSIGNOL, J. P. (1995).**Anthroposols. In D. Baize & M.-C. Girard (Eds.), *Référentiel pédologique* (pp. 95–98). Paris, France: INRA.
- BARRIUSO, E. (1985).** Caractérisation des fractions organo-minérales et des constituants humiques d'un sol de pelouse sub-alpine. Thèse de doctorat, Université de Nancy.
- BELOUAHEM-ABED, D. (2012).** Étude écologique des peuplements forestiers des zones humides dans les régions de Skikda, Annaba et El Tarf (Nord-Est algérien). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba (Algérie).
- BENLAKHLEF, B. (2008).** L'aire métropolitaine, un nouveau champ d'analyse de la ville algérienne : L'exemple d'Annaba. In *Penser la ville – Approches comparatives* (p. 259). Khenchela, Algérie: Halshs-00382602.
- BENSID, Z., HALITAT, T., SBIH, M., & MESSAADIA, H. (2015).** Status of soil organic matter of cedar stands in forest mountains of Belezma (Aurès, Algeria). *Research Journal of Forestry*, 9(1), 6–21.
- BENSLAMA, A., LUCAS, I. G., JORDAN, V. M. M., ALMENDRO-CANDEL, M. B., & NAVARRO-PEDREÑO, J. (2024).** Carbon and nitrogen stocks in topsoil under different land use/land cover types in the Southeast of Spain. *Agri Engineering*, 6(1), 396–408.
- BENSLAMA, A., KHANCHOUL, K., BENBRAHIM, F., BOUBEHZIZ, S., CHIKHI, F., & NAVARRO-PEDREÑO, J. (2020).** Monitoring the variations of soil salinity in a palm grove in Southern Algeria. *Sustainability*, 12(15), 6117.
- BENSLIMANE, Z., FARAOUN, F., & LATRECHE, A. (2023).**Land use and impact on soil organic carbon stock in a semi-arid region of Algeria. *Al-Qadisiyah Journal for Agriculture Sciences*, 13(1), 36–49.
- BENYACOUB, S., LOUANCHI, M., BABA AHMED, R., BENHOUBOU, S., BOULAHBAL, R., CHALABI, B., HAOU, F., ROUAG, R., & ZIANE, N. (1998).**Plan directeur de gestion du Parc national d'El Kala et du complexe des zones humides (Wilaya d'El Tarf). Alger, Algérie : Ministère de l'Agriculture et des Forêts, Direction générale des forêts.
- BERNOUX, M., FELLER, C., ESCHENBRENNER, V., CERRI, C. C., & CERRI, C. E. P. (2004).** Séquestration du carbone dans le sol. *Bulletin du Réseau Érosion*, 23, 29–42.

- BIRHANU, I., MUKTAR, M., KIBEBEW, K. (2016).** Impact of deforestation and subsequent cultivation on soil fertility in Komto, Western Ethiopia. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 7(12), 212-22
- BLAKE, G. R., & HARTGE, K. H. (1986).** Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, 363-382.
- BONGIORNO, G., BÜNEMANN, E. K., OGUEJIOFOR, C. U., MEIER, J., GORT, G., COMANS, R., DE GOEDE, R. (2019).** Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 99, 38-50.
- BONNEAU, M., & SOUCHIER, B. (1994).** *Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol*. Masson.
- BOT, A., & BENITES, J. (2005).** The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production (FAO Soils Bulletin No. 80). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- BOUAZOUNI, O. (2004).** Parc National d'El Kala : Etude socio-économique du PNEK. Projet MedMPA, UNEP, MAP, RAC-SPA. 50.
- BOUBEHZIZ, S. (2021).** Spatial and temporal characterization of soil organic carbon stocks under three types of vegetation formations in the northeast of Algeria. Thèse de doctorat. Université de Annaba. 180.
- BOUBEKEUR, F. Z. (2021).** Contribution à l'étude de la biodiversité des zones humides de l'Est algérien : état des lieux, gestion et valorisation. Thèse de doctorat. Université Djiali Liabes de Sidi Bel Abbes (Algérie). 161.
- BOUGHEDIRI, S., & BENSLAMA, M. (2020).** Pluie pollinique et inventaire floristique dans la ville d'Annaba (Algérie). *Nature & Technology*, (23), 63-73.
- BOUKENG, J. E. D. (2021).** Dynamique et services des écosystèmes agroforestiers autour d'une aire protégée du Cameroun. Thèse de doctorat. Université Laval. 132.
- BOUMARAF, W. (2009).** Cartographie et impact de la qualité des eaux du lac Oubeïra sur la relation sol-végétation (Parc National d'El Kala). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba (Algérie). 82.

- BOUNOUARA, Z. (2018).** Origine et évolution de la matière organique dans les sols des zones sub-humide : cas de la région de Skikda. Thèse de doctorat. Université de Batna 1-Hadj Lakhder. 149.
- BOUDJEMAA, S. (2007).** Contribution à l'étude des propriétés des sols de la région d'Annaba. Mémoire d'ingénieur d'état en écologie et environnement. Université Badji Mokhtar Annaba (Algérie).
- BOUZID, S. (2018).** Caractérisation et écologie des peuplement des amphibiens dans le Nord-Est de l'Algérie. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba (Algérie). 177.
- BRADY, N. C., & WEIL, R. R. (2002).** The nature and properties of soils (13th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- BRAHIM, N., GALLALI, T., & BERNOUX, M. (2014).** Soil organic carbon stocks and its variation according to different land uses in Tunisia. *International Journal of Research in Applied Science*, 2, 5-8.
- BRAUN, H. M. H., & KRUIJNE, R. (1994).** Soil conditions. In H. P. Ritzema (Ed.), *Drainage principles and applications* (2nd ed., rev., pp. 77–110). Wageningen.
- BÜNEMANN, E. K., MÄDER, P., WOHLFAHRT, J., BRUSSAARD, L., BONGIORNO, G., DE GOEDE, R., & CASPARI, T. (2016).** Concepts and Indicators of Soil Quality: A Review. Ref. Ares, 6570044.
- BURKE, I. C., YONKER, C. M., PARTON, W. J., COLE, C. V., FLACH, K., & SCHIMEL, D. S. (1989).** Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53(3), 800-805.
- BURUSO, F., ADIMASSU, Z., & SIBALI, L. (2023).** Effects of land use/land cover changes on soil properties in Rib watershed, Ethiopia. *Catena*, 224.
- CARDINAEL, R., CHEVALLIER, T., CAMBOU, A., BERAL, C., BARTHES, B. G., DUPRAZ, C., & CHENU, C. (2017).** Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243-255.
- CHAN, Y. (2008).** Increasing soil organic carbon of agricultural land. *Primefact*, 735, 1–5.
- CHEDDADI, R., GUIOT, J., & JOLLY, D. (2001).** The Mediterranean vegetation: What if the atmospheric CO₂ increased? *Landscape Ecology*, 16, 667–675.

- CHEMEDA, M., KIBRET, K. T., & FITE, T. (2017).** Influence of different land use types and soil depths on selected soil properties related to soil fertility in Warandhab Area, Horo Guduru Wallaga Zone, Oromiya, Ethiopia. *International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 4(2), 68–78.
- CHEN, Y., HAN, M. G., YUAN, X., HOU, Y. H., QIN, W. K., ZHOU, H. K., ZHAO, X. Q., KLEIN, J. A., & ZHU, B. (2021).** Warming has a minor effect on surface soil organic carbon in alpine meadow ecosystems on the Qinghai–Tibetan plateau. *Global Change Biology*, 28, 1618–1629.
- CHETTIB, A. (2020).** Utilisation des habitats et facteurs de distribution de certaines espèces aviennes dans les zones humides du Nord-Est Algérie. Thèse de doctorat, Université de M'sila (Algérie), 127 p.
- CHETTIBI, F., KHELIFA, R., ABERKANE, M., BOUSLAMA, Z., & HOUHAMDI, M. (2013).** Diurnal activity budget and breeding ecology of White-headed duck (*Oxyura leucocephala*) at Lac Tonga (Northeast Algeria). *Zoology and Ecology*, 23(3), 183–190.
- CHEVALLIER, T., RAZAFIMBELO, T., CHAPUIS-LARDY, L., & BROSSARD, M. (2020).** Carbone des sols en Afrique : impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. Rome: Food & Agriculture Organization.
- CHRISTENSEN, B. T. (2001).** Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 52(3), 345–353.
- CLEMENT, M., & PIELTAIN, F. (2003).** Analyse chimique du sol. Paris : TEC & DOC,
- DAHMANI, C., BENSLAMA, A., MAKINECI, E., OZDEMIR, E., BENSLAMA, M., & NAVARRO-PEDREÑO, J. (2025).** Evaluation of Topsoil Quality and Organic Carbon Content in Different Land Use Types–Northeastern Part of Algeria. *Applied Ecology and Environmental Research*, 23(4), 8013-8031.
- DAMAY, N., JULIEN, J.L. (1995).** Les indicateurs du statut acido-basique des sols. Station agronomique de l'Asine.45.
- DAJOZ R. (1985).** *Precis of ecology*. Ed. Bordeaux, Paris, 505.
- DAJOUZ, R. (1974).** *Dynamique des populations*. Masson et Cie, Paris, 301.
- DAROU, A., WEISSKOPF, P., OBERHOLZER, H, R., BENSLAMA, M. (2018).** Evaluation of total Carbon and total Nitrogen content in two Algeria regions under the effect of three tillage systems. *International Journal of Biosciences*,12(1),410-416.1-8.

- DELCOUR, F. (1981).** Initiation à la pédologie, Fac, Sc, Agron. Gembloux. 78.
- Dhankher, K.P., Foyer, C.H. (2018). Climate resilient crops for improving global food security and safety. *Plant Cell Environ.* 41, 877–884.
- DIACONO, M., MONTEMURRO, F. (2010).** Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 401–422.
- DJONGMO, V. A., NOUMI, V. N., ZAPFACK, L., TRA, A. V. B. & SAÏDOU, A. (2019).** Carbon Sequestration Potential and Economic Value in Agroforestry Parkland to Tectonagrandis L. f.(Verbenaceae) in Central Africa: A Case Study to Department of Poli(Northern Region in Cameroon). *Advances in Research.* 1-16.
- DUCHAUFOR, P.H.(1997).** Abrégé de Pédologie. Sol, végétation, environnement. Masson, Paris.291.
- DUMAN, A., YILDIRIM, C., TUFEKCIOGLU, M., TUFEKCIOGLU, A., SATIRAL, C. (2023).** Variation in Certain Soil Properties Based on Land Use Type, and Elevation in Arhavi Sub-Basin, Artvin, Turkiye. *Sustainability*, 15(11), 9114.
- DURANT, J. H. (1954).** Les sols du bassin versant du Lac Tonga (carte au 1/50 000). S.E.S. Alger.
- DON, A., SEIDEL, F., LEIFELD, J., KÄTTERER, T., MARTIN, M., PELLERIN, S., & CHENU, C. (2024).** Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—Definitions and pitfalls. *Global Change Biology*, 30(1), e16983.
- DOETTERL, S., BERHE, A. A., NADEU, E., WANG, Z., SOMMER, M., FIENER, P. (2016).** Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews*, 154, 102-122.
- ELDRIDGE, D. J., DING, J., & TRAVERS S. K., (2023).** Wildfire effects on soils and soil processes. *Australia's Megafires : Biodiversity Impacts and Lessons from 2019-2020*, 49.
- Esayas, A. (2001). Some physico-chemical characteristics of the Raya valley report. *Ethiopian J Natural Ressources*, 3 (2), 179-93.
- FAO (2015).** Global soil organic carbon map (gsocmap) technical report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FENNI, M., & MACHANE, Y. (2010).** Changement climatique et agriculture de conservation. *Agronomie*.2010,7.

- FRANCAVIGLIA, R., ALMAGRO, M., & VICENTE-VICENTE, J. L. (2023).** Conservation agriculture and soil organic carbon: principles, processes, practices and policy options. *Soil Systems*, 7(1), 17.
- FRANZLUEBBERS, A. (2002).** Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Tillage Res.* 66, 95–106.
- FLUX, C., & YEAR, I. G. P. (2008).** Carbon sequestration to mitigate climate change.4.
- FUJISAKI, K., PERRIN, A.S., DESJARDINS, T., BERNOUX M., BALBINO, L.C., BROSSARD, M. (2015).** From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Global Change Biology.* 21, 2773–2786.
- FU, B., WANG, J., CHEN, L., QIU, Y. (2003).** The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 54(1-2), 197-213.
- GAO, M., ZHU, F., HOBBIE, E. A., ZHU, W., LI, S., GURMESA, G. A., WANG, A., FANG, X., ZHU, J., GUNDERSEN, P., ET AL. (2023).** Effects of nitrogen deposition on carbon allocation between wood and leaves in temperate forests. *Plants, People, Planet*, 5(3), 267–280.
- GEBEYAW, T.Y. (2019).** Impact of Land Use Types and Soil Depths on the Distribution of Soil Physical and Chemical Properties in Soils of Aboy Gara Watershed, at Gidan District, North Wollo Zone, Ethiopia. *Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology (NIJEST)* 3(2), 218 – 232.
- Girma, K., Yimer, F., Tamirat, T., Abdelkadir, A. (2023). Effect of Land Use Change on Soil Physico-Chemical Properties under Different Land Use System in Arsi Zone, Oromia Region, Ethiopia. *Journal of Biology and Nature* 15(1): 57-69.
- GETAHUN, D., WOGI, L., & KEBEDE, A. (2024).** Assessment of selected physical and chemical soil properties and organic carbon stock under different land-uses in Melka Gura Subwatershed of North Shewa Zone, Oromia, Ethiopia. *Sustainability in Environment*, 9(2),
- GIRARD, M. C., WALTER, C., RÉMY, J. C., BERTHELIN, J., & MOREL, J. L. (2011).** *Sols et environnement (2e éd.)*. Paris: Dunod.
- GIRMA, K., YIMER, F., TAMIRAT, T., ABDELKADIR, A. (2023).** Effect of Land Use Change on Soil Physico-Chemical Properties under Different Land Use System in Arsi Zone, Oromia Region, Ethiopia. *Journal of Biology and Nature*, 15 (1), 57-69.

- GITHONGO, M., KIBOI, M., MURIUKI, A., FLIESSBACH, A., MUSAFIRI, C., NGETICH, F. K. (2022).** Organic Carbon Content in Fractions of Soils Managed for Soil Fertility Improvement in Sub-Humid Agroecosystems of Kenya. *Sustainability*, 15(1), 683.
- GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, E. J., VEROZ, O., CONWAY, G., MORENO, M., KASSAM, A., MKOMWA, S., ORDOÑEZ-FERNÁNDEZ, R., TRIVIÑO-TORO, P., & CARBONELL-BOIX, R. (2019).** Meta-analysis on carbon sequestration through conservation agriculture in Africa. *Soil and Tillage Research*, 190, 22–30.
- GRAND, A., & MICHEL, V. (2020).** Soil organic matter (Best4Soil Factsheet). 3.
- GROSBELLET, C. (2008).** Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité. Thèse de doctorat. Université d'Angers. France. 241.
- GUALBERTO, A. V. S., DE SOUZA, H. A., SAGRILO, E., ARAUJO, A. S. F., MENDES, L. W., DE MEDEIROS, E. V., ... & LEITE, L. F. C. (2023).** Organic C Fractions in Topsoil under Different Management Systems in Northeastern Brazil. *Soil Systems*, 7(1), 11.
- GUO, N., SHI, X., ZHAO, Y., XU, S., WANG, M., ZHANG, G., WU, J., HUANG, B., KONG, C., (2017).** Environmental and anthropogenic factors driving changes in paddy soil organic matter: A case study in the middle and lower Yangtze River Plain of China. *Pedosphere*. 27, 926–937.
- HABTAMU, K., TEGENU, A., COLLICK, A. S., HUSIEN, A., & HAYMANOTE, K. (2008).** The Effect of Land Use and Its Management Practices on Plant Nutrient Availability and Carbon Sequestration. Cornell University Integrated Watershed Management and Hydrology Program, Bahir Dar, Ethiopia, 64-72
- HAGHDOOST, N., AKBARINIA, M., & HOSSEINI, S. M. (2013).** Land-use change and carbon stocks: A case study, Noor County, Iran. *Journal of Forestry Research*, 24, 461-469.
- HALASSI, I. (2018).** Ecologie de l'érismature à tête blanche *Oxyura leucocephala* dans les zones humides du littoral Est de l'Algérie. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas. 176
- HAMON, X., DUPRAZ, C., & LIAGRE, F. (2009).** L'agroforesterie, outil de séquestration du carbone en agriculture (Rapport d'expertise pour le Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Pêche). Agrofoot & INRA de Montpellier.
- IPCC. (2021).** Annex VII: Glossary. In J. B. R. Matthews, V. Möller, R. van Diemen, J. S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, & A. Reisinger (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth*

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2215–2256.

IUSS WORKING GROUPE WRB (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, Update International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106, Rome.

JIBRIN, A.1., MUKHTAR, I., MUHAMMAD, H., SABA A. L. (2023). Soil organic carbon stock and sequestration potential in southern guinea savanna ecological zone, Nigeria. Peer-review under responsibility of 46th SSSN Conference LOC2022. 46,439-446.9.

JIMENEZ, J. J., LAL, R., LEBLANCE, H. A., RUSSO, R. O., & RAUT, Y. (2008). The soil C pool indifferent agroecosystems derived from the dry tropical forest of Guanacaste, Costa Rica. *Ecological Engineering*, 34(4), 289-299.

JOLEAUD, L. (1936). Etude géologique de la région de Bone et la Calle , 2ème série stratigraphie et description générale Typo - litho et Jules Carbonel.199.

JOLEAUD, L. (1912). Étude géologique de la chaîne numidique et des monts de Constantine (Algérie). Thèse de doctorat ès sciences naturelles). Université de Paris, 342.

KAIRIS, O., KARAVITIS, C., SALVATI, L., KOUNALAKI, A., & KOSMAS, K. (2015). Exploring the impact of overgrazing on soil erosion and land degradation in a dry Mediterranean agro-forest landscape (Crete, Greece). *Arid land research and management*, 29(3), 360-374.

KALAMBUKATTU, J. G., SINGH, R., PATRA, A. K., ARUNKUMAR, K. (2013). Soil carbon pools and carbon management index under different land use systems in the Central Himalayan region. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B–Soil & Plant Science*, 63(3), 2000-5.

KEESSTRA, S. D., BOUMA, J., WALLINGA, J., TITTONELL, P., SMITH, P., CERDÀ, A., FRESCO, L. O. (2016). Forum paper: The significance of soils and soil science towards realization of the UN sustainable development goals (SDGS). *Soil Discussions*, 2016, 1-28.

KIBET, E., MUSAFIRI, C. M., KIBOI, M. N., MACHARIA, J., NG'ETICH, O. K., KOSGEL, D. K., NGETICH, F. K. (2022). Soil organic carbon stocks under different land utilization types in Western Kenya. *Sustainability*, 14(14), 826.

KIM, D.G., KIRSCHBAUM, M.U., BEEDY, T.L. (2016). Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 226, 65–78.

- KOOCH, Y., EHSANI, S., & AKBARINIA, M. (2020).** Stratification of soil organic matter and biota dynamics in natural and anthropogenic ecosystems. *Soil and Tillage research*, 200, 104621.
- KUMAR, S., A. KADONO, R. LAL, AND W. DICK. (2012).** Long term no till impacts on organic carbon and properties of two contrasting soils and corn yields in Ohio. *Soil Science Society of America Journal*. 76, 1798,1809.
- LABAN, P., METTERNICHT, G., & DAVIES, J. (2018).** Soil biodiversity and soil organic carbon: keeping drylands alive. Gland, Switzerland: IUCN, 10.
- LEHMANN, J., BOSSIO, D. A., KÖGEL-KNABNER, I., & RILLIG, M. C. (2020).** The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553.
- LAKEHAL, A. S., SEMAI, I., AOUNALLAH, O., BENSLAMA, M. (2023).** Study of Soil-Vegetation Relations in the Edough Peninsula (North East of Algeria). *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 24(4), 50-61.
- LAL, R. (2008).** Carbon sequestration. *Philos. Trans. Royal Soc. B* 363, 815–830.
- Lal, R. (2006). Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land degradation & development*, 17(2), 197-209.
- LAL, R. (2004).** Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2).
- Lambert, J. (1975). Abundance classes of organic matter. 209.
- LI, M., PENG, J., LU, Z., & ZHU, P. (2023).** Research progress on carbon sources and sinks of farmland ecosystems. *Resources, Environment and Sustainability*, 11, 100099.13.
- MACHADO, J. M., JOHNSON, J. C., TORNUST, C. G., TABORDA, E. P., WINCK, B. R. (2024).** Soil carbon stocks as affected by land-use changes across the Pampa of southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 48, e0230124.
- MAHDI, S. S., CHOUDHURY, S. R., GUPTA, S. K., JAN, R., BANGROO, S. A., BHAT, M. A., WANI, O. A., BAHAR, F. A., DHEKALE, B., & DAR, S. A. (2022).** Impact of climate change on soil carbon—Improving farming practices reduces the carbon footprint. In *Innovative approaches for sustainable development: Theories and practices in agriculture* (pp. 299–310).

MAHATA, S., SHARMA, V. N. (2021). The global problem of land degradation: A review. – National Geographical Journal of India. 67(2), 216-31.

MILIA, A. (2011). Use of electrical conductivity for the analysis of the hydrodynamic properties of soils. Master 2 Sciences of the Universe, Environment, Ecology Hydrology-Hydrogeology course. Pierre and Marie Curie University, School of Mines of Paris-France & National School of Rural Water and Forest Engineering.

MARGAL, P.B., GAIKWAD, A.S. AND TITIRMARE, N.S. (2023). Carbon Sequestration. In: S.A. Chaware et al. (Eds.), *Advances in Soil Science* 1(09), 157-190. Bright Sky Publications, New Delhi, India.

MARSELANTI, ZUBAIR, H., NESWATI, R. (2023). Soil Carbon Storage in Forest and Agriculture Land Use in the Tanralili Watershed. In: 2023 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, San Francisco, CA, 1230, 012036.

MATANO, A. S., KANANGIRE, C. K., ANYONA, D. N., ABUOM, P. O., GELDER, F. B., DIDA, G. O., OWUOR, O. P., OFULLA, A. V. O. (2015). Effects of land use change on land degradation reflected by soil properties along Mara River, Kenya and Tanzania. *Open Journal of Soil Science* ,5 (1), 20-38.

MATALLAH, S., & MATALLAH, F. (2024). Effect of grazing on the composition and floristic diversity during fallow at El-Tarf, Algeria. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*,41(1).

MATHEWOS, M., HAILU, B., & KETEMA, A. (2025). The impacts of landscape positions and land management practices on soil physicochemical properties in Mancha Galgo watershed, Rift Valley Basin of Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 9(2), 407-423.

MATHIEU, C., PIELTAIN, F., JEANROY, E. (2003). *Analyse chimique des sols: Méthodes choisies.* Tec & doc, Paris.

MECHRI, M., BOUJILA, K., ZIADI, N., RAZA, T., BELTAYEF, H., EASH, N. S., JEDIDI, N., GHARBI, A., HASHEM, A. & ABD ALLAH, E. F. (2023). Soil aggregation and associated organic carbon and total nitrogen in a sandy loam soil under long-term tillage effects. *Agron*, 13(10), 2520.

MEDDOUR, S. O., MEDDOUR, R., LEONE, V., LOVREGGIO, R., DERRIDJ, A. (2013). Analysis of forest fires causes and their motivations in northern Algeria: The Delphi method. *iForest Biogeosciences and Forestry*. 6(5), 247-254.

MELLOUK, K., & AMIRECHE, H. (2021). Dynamique urbaine et durabilité des hydrosystèmes. Thèse de doctorat. Université Constantine 3 Salah Boubnider, Institut de gestion des techniques urbaines. 291.

MERABTENE, M. D. E. (2022). Etude de la variation du stock de carbone organique (SCO) des sols forestiers en fonction de la couverture végétale : Cas de la région de Sidi Bel Abbes (Algérie occidentale). Thèse de Doctorat. Université Djillali Liabes De sidi Bel Abbes. 167.

MERABTENE, M. D., FARAOUN, F., MLIH, R., DJELLOULI, R., LATRECHE, A., & BOL, R. (2021). Forest Soil Organic Carbon Stocks of Tessala Mount in North-West Algeria- Preliminary Estimates. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 520284.

MEZBOUR, R. (2018). Contribution à l'étude de la qualité de l'eau du Lac des Oiseaux (wilaya d'El-Tarf) et étude de la dynamique de la végétation. Thèse de doctorat. Université de Mohamed Chérif Messaadia– Souk Ahras. 228.

MISHRA, G., & SARKAR, A. (2020). Studying the relationship between total organic carbon and soil carbon pools under different land management systems of Garo hills, Meghalaya. *Journal of Environmental Management*, 257, 110002.

MOLLA, E., GETNETA, K., MEKONNEN, M. (2022). Land use change and its effect on selected soil properties in the northwest highlands of Ethiopia. *Heliyon*. 8, e10157.

MUÑOZ, R. M., ABD-ELMABOD, S. K., ZAVALA, L. M., DE LA ROSA, D., & JORDAN, A. (2017). Climate change impacts on soil organic carbon stocks of Mediterranean agricultural areas: a case study in Northern Egypt. *Agriculture, ecosystems & environment*, 238, 142-152.

MOREL, R. (1989). Les sols cultivés. Lavoisier. 2^{ème} Edition. Paris. 373.

MURPHY, B.W. (2014). Soil Organic Matter and Soil Function–Review of the Literature and Underlying Data. Department of the environment, canberra, Australia. 155.

NAVARRO-PEDREÑO, J., ALMENDRO-CANDEL, M. B., ZORPAS, A. A. (2021). The increase of soil organic matter reduces global warming, myth or reality? *Sci*. 3(1), 18.

NDIAYE, O., DIOP, A. T., AKPO, L. E., & DIENE, M. (2014). Dynamique de la teneur en carbone et en azote des sols dans les systèmes d'exploitation du Ferlo: cas du CRZ de Dahra. *Journal of Applied Biosciences*, 83, 7554-7569, 1997–5902.

NGUEKENG, P. B. C., JIOFACK, R. B., TEMGOUA, L., MBOUWE, I. F., TCHANOU, A. V., & TCHOUNDJEU, Z. (2018). Plant diversity, ecological services, and carbon stock assessment in cocoa agroforestry plantations of forest and savannah transitions in Cameroon. *Forest Biomass and Carbon*, 45.

NOORI, N. W., ISMAEAL, A. S. (2023). Preparing Maps of the Distribution of Organic Matter and Calcium Carbonate in Northern Iraq. In: *Proc of the Int. Conference of Modern Technologies in Agricultural Sciences*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, San Francisco, CA, September, 2023, 082069.

NYASIMI, M., AMWATA, D., HOVE, L., KINYANGI, J., & WAMUKOYA, G. (2015). L'agriculture intelligente face au climat: Quel impact pour l'Afrique? Wageningen, Pays-Bas: Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (CTA).

OGUNLEYE, A., & AGE, S. (2025). Land use effects on soil properties and carbon stocks of agricultural and agroforestry landscapes in a rainforest zone of Nigeria. *Advances in Modern Agriculture* 2025, 6(2), 2964.

OLSON, K. R., AL-KAISI, M. M., LAL, R., & LOWERY, B. (2014). Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 348–360.

OLUJOBI, O., ADEYINKA, M. K., BASHIRU, W. A. (2022). Soil carbon storage as influenced by land use types in Akure forest Reserve, Ondo State, Nigeria. *International Journal of Scientific Advances*, 3(3), 408-411.

OSBORN, D., CUTTER, A., ULLAH, F. (2015). Universal sustainable development goals. Understanding the transformational challenge for developed countries, 2(1), 1-25.

OZENDA, P. (1982). Les végétaux dans la biosphère. Paris : Éditions Doin. ISBN 2-7040-0399,8, 431.

PATW EL-TARF PHASE1, PLAN D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE WILAYA D'EL-TARF PHASE 1.2011. L'Evaluation territoriale et le diagnostic « Etat des lieux et analyse des tendances ».

PEI, S., FU, H., & WAN, C. (2008).Changes in soil properties and vegetation following enclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124(1-2), 33-39.

PHAM, T.G., NGUYEN, H.T., KAPPAS, M. (2018). Assessment of soil quality indicators under different agricultural landuses and topographic aspects in Central Vietnam. *Int.Soil Water Conserv. Res.* 6, 280–288.

POST, W. M., & KWON, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global change biology*, 6(3), 317-327.

PRAKASH, T., & SHIMRAH, T. (2023).A review on soil carbon sequestration in different land use and land cover.*Ecology, Environment and Conservation*, 29, S332-S340.

RAHARIMALALA, F., AMDRIAMAMPANDRY, H., & ANDRIAMAMPINANINA, N. (2013). Thématique 3 : Efficacité de la plantation d'espèces locales dans la restauration forestière et l'agroforesterie. Les espèces locales pour l'agroforesterie. HAFATRA Haitao momba ny Ala sy Fanarenana ny Ala ary TRAI-kefa. Technique et savoir pour la restauration forestière. La restauration forestière à Vohimana, 52-62.

QADIR, M., HUSSAIN, A., IQBAL, A., SHAH, F., WU, W., & CAI, H. (2024). Microbial utilization to nurture robust agroecosystems for food security. *Agronomy*, 14(9), 1891.

RAHMAN, N., GILLER, K. E., DE NEERGAARD, A., MAGID, J., VAN DE VEN, G., & BRUUN, T. B. (2021). The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. *Journal of Environmental Management*, 278, 111446.

RAMADE, F. (2008).Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de labiodiversité. Edition Dunod. 726.

RASMUSSEN, P. E., & PARTON, W. J. (1994).Long-term effects of residue management in wheat-fallow: I. Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 58(2), 523-530.

REGASA, A. G. (2023). Conversion in Land Use Change Soil Physiochemical Properties in the Highland of Western Ethiopia. *Research Square*. 19.

RHOADES, J. D. (1996). Salinity. Electrical conductivity and total dissolved solids. – In: Sparks, R. L. (ed.) *Methods for Soil Analysis, Part 3 Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison.

SAIDY, A. R., SMERNIK, R. J., BALDOCK, J. A., KAISER, K., & SANDERMAN, J. (2013). The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide. *Geoderma*, 209, 15-21.

SAMAI, I. (2017). Etude des relations sol-végétation de la chênaie d'Ouled Bechih (Souk-Ahras) « dynamique de la matière organique ». Thèse de doctorat. Université de Annaba.175.

SCHUMAN, G.E., JANZEN, H.H., HERRICK, J.E. (2002). Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 116 : 391-396.

SCOTT, N.A., TATE, K. R., GILTRAP, D. J., SMITH, C. T., WILDE, R. H., NEWSOME, P. F. J., & DAVIS, M. R. (2002). Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zealand: quantifying baseline soil carbon stocks. *Environmental Pollution*, 116(1), 161-186.

SEIFU, W. G., ELIAS, E., GEBRESAMUEL, G. (2020). The effects of land use and landscape position on soil physicochemical properties in a semiarid watershed, northern Ethiopia. – *Applied and Environmental, Soil Science*, 2020,8816248.

SHEIKH, M.A., KUMAR, M. AND BUSSMANN, R.W. (2009). Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon Balance and Management*. 4(1), 1-6.

SIX, J., CONANT, R.T., PAUL, E.A, PAUSTIAN K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241: 155–176.

SMITH, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Glob. Chang. Biol.* 22, 1315–1324.

SOMMER, R., PAUL, B. K., MUKALAMA, J., & KIHARA, J. (2018). Reducing losses but failing to sequester carbon in soils—the case of Conservation Agriculture and Integrated Soil Fertility Management in the humid tropical agro-ecosystem of Western Kenya. *Agriculture, ecosystems & environment*, 254, 82-91.

SOUSSANA, J. F., LOISEAU, P., VUICHARD, N., CESCHIA, E., BALESSENT, J., CHEVALLIER, T., & ARROUAYS, D. (2004).Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil use and management*, 20(2), 219-230.

TABET, S. (2008).Le changement climatique en Algérie orientale et ses conséquences sur la végétation forestière. Thèse doctorat. Université Mentouri Constantine. 125

TEDONE, L., VERDINI, L., DE MASTRO, G. (2023).Effects of Different Types of Soil Management on Organic Carbon and Nitrogen Contents and the Stability Index of a Durum Wheat–Faba Bean Rotation under a Mediterranean Climate. *Agronomy*, 13(5), 1298.

TORQUEBIAU, E., ROUDIER, P., DEMENOIS, J., SAJ, S., HAINZELIN, É., & MARAUX, F. (2018). Agro-écologie et changement climatique : des liens intimes et porteurs d'espoir. *La transition agro-écologique*, 245.

TORQUEBIAU, E. (2017).Le changement climatique, un défi pour la recherche : l'exemple de l'initiative " 4%".

VANDANA, V. J., LATARE, A. M., PATEL, K., DIWAKAR, A. K., PRAJAPATI, S. K., SACHAN, D. S., & SONI, R. L. (2023).Study of Physio-chemical Properties of Soil in Various Land Use Systems of Krishna District, Andhra Pradesh, India. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(11), 180-188.

VERMA, S., JAYAKUMAR, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2(3), 168-176.

VELA, E., BENHOUBOU, S. (2007). Evaluation d'un nouveau point chaud de biodiversité végétale dans le bassin Méditerranéen (Afrique du Nord). *Comptes Rendus Biologies*. 330(8), 589-605.

WANG, M., SU, Y., & YANG, X. (2014). Spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in desert grasslands of the Hexi Corridor, Northwest China. *PLoS ONE*, 9(4), e94652.

WAVEL, M., GAEL, M. O. R., NEIL-YOHAN, M., ABDRAMANE, A., FRANÇOIS, N. N. G., & JACQUES, E. (2025).Effects of cultivation time on soil physical, chemical properties, soil

organic carbon, total nitrogen stocks and dioxide carbon emission in Southeast of Chad. *Catena*, 258, 109267.

WEN, Y., YAO, W., YU, T., CHENG, L., ZHANG, Q., YANG, J., ... & ZANG, H. (2025). Long-term organic farming improves the red soil quality and microbial diversity in subtropics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 381, 109410.

WILLIAMS, T. O., MUL, M., COFIE, O., KINYANGI, J., ZOUGMORE, R., WAMUKOYA, G., ... & CAMPBELL, B. (2015). L'agriculture Intelligente face au climat dans le contexte Africain. Document de référence, Banque Africaine de Développement, 32.

XIAO, C. (2015). Soil organic carbon storage (sequestration) principles and management : potential role for recycled organic materials in agricultural soils of Washington State. Waste 2 Resources Program, Washington Department of Ecology.109.

YITBAREK, T., GEBREKIDEN, H., KIBRET, K. T., BEYENE, S. (2013). Impacts of land use on selected physicochemical properties of soils of Abobo area, western Ethiopia. *Agriculture Forestry and Fisheries*. 2(5), 177-183.

ZHANG, Z., HE, J., HUANG, M., & ZHOU, W. (2023). Is regulation protection? Forest logging quota impact on forest carbon sinks in China. *Sustainability*, 15(17), 13740

ZHONG, C., LI, X.J., HE, Y.Y., QIU, W.W., LI, J., ZHANG, X.Y., HU, B.Q. (2020). Spatial variation of soil organic matter and its influencing factors in Guangxi, China. *Sci. Geographica Sini*. 40, 478–485.

ZHU, E.X., CAO, Z.J., JIA, J., LIU, Z.Z., ZHANG, Z.H., WANG, H., DAI, G.H., HE, J.S., FENG, X.J.(2021). Inactive and inefficient: Warming and drought effect on microbial carbon processing in alpine grassland at depth. *Global Change Biol*. 27, 2241–2253.

