République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi -Tébessa-
Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie
Département D'Êtres Vivants

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master L.M.D

Filière : Biologie et Physiologie Végétale

Spécialité : Ecophysiologie Végétale

Titre

Effet du biochar et nanobiochar sur les paramètres de fertilité du sol

Présentée par :
Louafi Ismahane
Slimi Kanza

Devant le jury :

Ghedabnia Karima	Examinatrice	M.A.A	U. Echahid Cheikh Larbi Tébessi-Tébessa
Neffar Souad	Présidente	Pr	U. Echahid Cheikh Larbi Tébessi-Tébessa
Boudjabi Sonia	Encadrante	Pr	U. Echahid Cheikh Larbi Tébessi-Tébessa

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la patience, la force et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

C'est avec un profond respect et une immense gratitude que j'adresse mes sincères remerciements à ***Mme Boudjabi Sonia,*** *Professeur au Département de Biologie des êtres vivants à l'Université de Tébessa, pour son encadrement de grande qualité, sa disponibilité, ses orientations précieuses, ainsi que pour la confiance qu'elle nous accordée. Son soutien constant, ses conseils avisés et ses qualités humaines et scientifiques ont été déterminants dans la réalisation de ce travail.*

Mes plus vifs remerciements et toute ma considération à ***Mme. Neffar Souad*** *(Professeur au Département de Biologie des êtres vivants, Université de Tébessa) qui nous a fait l'honneur d'accepter de juger cette étude et de présider le présent jury.*

Mes plus vifs remerciements et toute ma considération à ***Mme Ghedabnia Karima*** *(Maitre assistante au Département de Biologie des êtres vivants, Université de Tébessa) d'avoir accepté d'être membre de ce jury et de nous faire l'honneur de juger ce travail.*

Je tiens à exprimer ma reconnaissance toute particulière à ***Dr Benkhedim Khouloud****, pour tous les efforts considérables qu'elle a déployés à nos côtés. Je la remercie chaleureusement pour son accompagnement continu, sa patience, son engagement sincère et son dévouement sans faille. Elle n'a jamais hésité à nous consacrer de son temps, à nous guider et à nous encourager à chaque étape. Sa présence a été d'un soutien inestimable et a grandement contribué à surmonter les difficultés rencontrées. Qu'elle trouve ici l'expression de nous profonde gratitude et de nous grand respect.*

Enfin, nous prie Dieu de récompenser toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, et de faire de cet effort une œuvre utile et bénéfique.



RESUME

Résumé

Dans le but de mettre en évidence l'effet acidifiant du marc de café et des margines sur l'effet alcalinisant du biochar ainsi que sur certains paramètres physicochimiques du sol, une expérimentation a été conduite sous serre à la Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature. Le dispositif expérimental comprenait 27 pots contenant chacun 3 kg de sol, répartis selon plusieurs traitements : témoin sans amendement, biochar et nanobiochar seuls (5 g/kg de sol), marc de café seul (150 g/pot), margines seules (35ml /pot) ainsi que différentes combinaisons associant biochar ou nanobiochar avec les margines et/ou le marc de café.

Les résultats ont montré que l'apport du biochar a augmenté le pH du sol jusqu'à 8,71, tandis que l'association avec les margines a réduit cette valeur de 6 %, atteignant 8,18, ce qui met en évidence leur effet acidifiant. La conductivité électrique (EC) la plus élevée (4143.33µS/ cm) a été enregistrée avec la combinaison nanobiochar + margines. La matière organique a connu une amélioration notable, particulièrement avec l'association biochar + margines, atteignant 6,98 %. Les teneurs en calcaire actif et total ont également augmenté sous l'effet du biochar, avec des valeurs respectives de 8,66 % et 54,43 %. Par ailleurs, les nitrates ont diminué avec le nanobiochar (0,3 mg/g de sol), tandis que le phosphore assimilable a fortement baissé sous l'effet des margines (3,05 µg/g de sol) en comparaison avec le témoin (17,10µg/g de sol).
Ces résultats suggèrent que l'association des amendements organiques, notamment les margines et le marc de café, pourrait constituer une stratégie intéressante pour atténuer l'alcalinité induite par le biochar et améliorer certaines propriétés du sol, bien qu'un suivi à long terme soit nécessaire afin d'évaluer leurs effets sur la fertilité et la disponibilité des nutriments.

Mots clés : Biochar, nanobiochar, margines, marc de café, physicochimie du sol, alcalinité

RESUME

Abstract

To highlight the acidifying effect of spent coffee grounds and olive mill wastewaters (OMW) on the alkalizing effect of biochar, as well as on various physicochemical soil parameters, a greenhouse experiment was conducted at the Faculty of Exact Sciences and Natural Sciences. The experimental design consisted of 27 pots, each containing 3 kg of soil, divided into several treatments: an unamended control, biochar and nanobiochar alone (5 g/kg), spent coffee grounds alone (150 g/pot), OMW alone (35 ml/pot), and various combinations of biochar or nanobiochar with OMW and/or spent coffee grounds.

The results showed that biochar application increased soil pH to 8.71, while the combination with OMW reduced this value by 6% to 8.18, demonstrating their acidifying potential. The highest electrical conductivity (EC), reaching 4143.33 µS/cm, was recorded with the nanobiochar + OMW combination. Organic matter showed a significant improvement, particularly with the biochar + OMW association, reaching 6.98%. Active and total limestone contents also increased under the effect of biochar, with values of 8.66% and 54.43%, respectively. Furthermore, nitrates decreased with nanobiochar (0.3 mg/g), while available phosphorus dropped sharply under the effect of OMW (3.05 µg/g) compared to the control (17.10 µg/g).

These results suggest that the association of organic amendments, particularly OMW and spent coffee grounds, could be an effective strategy to mitigate biochar-induced alkalinity and improve certain soil properties, although long-term monitoring is necessary to evaluate their effects on fertility and nutrient availability.

Keywords: Biochar, nanobiochar, olive mill wastewaters (OMW), spent coffee grounds, soil physicochemistry, alkalinity.

RESUME

ملخص

بهدف إبراز التأثير المحمض لتفل القهوة وزبار الزيتون على التأثير القلوي الفحم الحيوي، وكذا على بعض الخصائص الفيزيوكيميائية للتربة، أُجريت تجربة تحت الدفيئة بكلية العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة. شمل التصميم التجريبي 27 أصيصاً يحتوي كل منها على 3 كغ من التربة، وزعت على عدة معالجات: عينة شاهدة بدون إضافات، الفحم الحيوي والفحم الحيوي النانوي بمفردهما (5غ/كغ)، تفل القهوة بمفرده (150غ/أصيص)، زبار الزيتون بمفرده (35 مل/أصيص)، بالإضافة إلى تركيبات مختلفة تجمع بين الفحم الحيوي أو الفحم الحيوي النانوي مع زبار الزيتون و/أو تفل القهوة.

أظهرت النتائج أن إضافة الفحم الحيوي أدت إلى رفع pH التربة ليصل إلى 8,71، بينما أدت إضافته مع زبار الزيتون إلى خفض هذه القيمة بنسبة 6% لتصل إلى 8,18، مما يؤكد التأثير المحمض لزبار الزيتون. سُجلت أعلى ناقلية كهربائية (EC) (4143,33 ميكروسيمنس/سم) عند استخدام تركيبة الفحم الحيوي النانوي + زبار الزيتون. كما شهدت المادة العضوية تحسناً ملحوظاً، خاصة مع مزيج الفحم الحيوي وزبار الزيتون حيث بلغت 6,98 %. وارتفعت مستويات الكلس النشط والكلي تحت تأثير الفحم الحيوي لتصل إلى 8,66% و54,43% على التوالي. من جهة أخرى، انخفضت النترات مع الفحم الحيوي النانوي (0,3 مغ/غ)، بينما انخفض الفسفور المتاح بشكل حاد تحت تأثير زبار الزيتون (3,05 ميكروغ/غ) مقارنة بالشاهد (17,10 ميكروغ/غ).

تشير هذه النتائج إلى أن دمج المصلحات العضوية، لا سيما زبار الزيتون وتفل القهوة، قد يمثل استراتيجية واعدة للتخفيف من القلوية الناتجة عن الفحم الحيوي وتحسين بعض خصائص التربة، رغم ضرورة المتابعة على المدى الطويل لتقييم آثارها على الخصوبة وتوافر العناصر الغذائية.

الكلمات المفتاحية الفحم الحيوي، الفحم الحيوي النانوي، زبار الزيتون، تفل القهوة، فيزيوكيمياء التربة، القلوية.

SOMMAIRE

Titre	Pages
Remerciements	
Résumé	**i**
Abstract	**ii**
ملخص	**iii**
Liste des tableaux	**vi**
Liste des figures	**vii**
I. Introduction	**01**
II. MATERIEL ET METHODES	**07**
2.1. Localisation de l'essai	**07**
2.2. Le dispositif expérimental	**07**
2.3. Les matériaux utilisés	**07**
2 .4. Le prélèvement des échantillons de sol	**08**
2.5. Les analyses physico-chimiques du sol	**08**
2.5.1. Le pH	**08**
2.5.2. La conductivité électrique	**08**
2.5.3. Le calcaire total (TCCE%)	**09**
2.5.4. Le calcaire actif (ACCE%)	**09**
2.5.5. La matière organique	**10**
2.5.6. Le phosphore assimilable	**10**
2.5.7. Les nitrates	**10**
2.6. Les analyses statistiques	**11**
III Résultats et discussion	**13**
Conclusion	**25**
Références bibliographiques	**27**
Annexes	**I**

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
01	Les caractéristiques du sol et les amendements utilisés.	**08**
02	Résultats de l'ANOVA pour les paramètres du sol.	**13**

Liste des figures

N°	Titre	Page
01	Effet des traitements sur le pH.	**14**
02	Effet des traitements sur la conductivité électrique.	**16**
03	Effet des traitements sur la teneur de la matière organiques.	**18**
04	Effet des traitements sur la teneur du calcaire actif.	**19**
05	Effet des traitements sur la teneur du calcaire total.	**20**
06	Effet des traitements sur la teneur du phosphore assimilable.	**21**
07	Effet des traitements sur la teneur des nitrates.	**23**

Introduction

I. Introduction

L'Algérie présente une grande diversité géographique et climatique grâce à la vaste superficie de son territoire, allant du littoral méditerranéen aux régions sahariennes, ce qui favorise une importante diversité des écosystèmes (Atkinson *et al.,* 2010). Cependant, cette diversité naturelle s'accompagne également de contraintes environnementales variées, climatiques et édaphiques, qui influencent directement la fertilité des sols (Atkinson *et al.,* 2010).

Le sol est un système complexe et dynamique, constitué de fractions minérales, de matière organique, d'eau et d'air, en interaction constante. Il joue un rôle fondamental en assurant le stockage et la disponibilité des nutriments, pour la végétation. La qualité et la fertilité du sol sont déterminées par plusieurs paramètres physico-chimiques essentiels. Parmi ces paramètres figurent le pH, qui influence la disponibilité des éléments nutritifs, la conductivité électrique, indicatrice de la salinité, ainsi que le carbone organique, qui constitue un indicateur clé de la qualité du sol. D'autres éléments, tels que les carbonates, le phosphore et les nitrates, jouent également un rôle déterminant dans la nutrition des plantes et dans la productivité agricole (NRCS, 2022).

Il faut dire qu'en Algérie, le secteur agricole est confronté à de nombreux défis, notamment la dégradation progressive des sols, la diminution de la matière organique et les effets du changement climatique. Ces contraintes, souvent aggravées par des pratiques agricoles inadaptées telles que le labour intensif ou l'usage excessif d'intrants chimiques, contribuent à une détérioration continue de la qualité des sols. Il en résulte une baisse significative de leur fertilité, compromettant ainsi la productivité agricole à long terme (Lal, 2016).

Cette situation est particulièrement préoccupante dans les régions semi-arides, où les conditions climatiques accentuent ces problématiques. En effet, la faible pluviométrie et les températures élevées limitent fortement la production de la biomasse végétale, réduisant ainsi les apports naturels en matière organique au sol (Haddouche, 2009). Par conséquent, ces sols deviennent fragiles traduisant une fertilité limitée, rendant les systèmes agricoles encore plus vulnérables.

La région de Tébessa, située à l'est de l'Algérie, appartient aux régions semi-arides caractérisées par des précipitations faibles et irrégulières ainsi que par des températures relativement élevées (Neffar *et al.,* 2011). Ces conditions climatiques influencent directement les propriétés physico-chimiques des sols, qui sont souvent caractérisés par une faible teneur en matière organique associée à une teneur élevée en carbonates (Neffar *et al.,* 2011). La présence importante des carbonates limite la disponibilité de certains éléments nutritifs, notamment le phosphore,

et réduit leur assimilation par les plantes (Brady & Weil, 2017). Face à la dégradation des sols et à la diminution de leur fertilité, le recours aux amendements organiques apparaît comme une solution durable et respectueuse pour l'environnement. Ces amendements permettent d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, tout en favorisant la valorisation des déchets organiques. Parmi ces solutions, le biochar qui suscite un intérêt croissant au sein de la communauté scientifique en raison de ses effets potentiels sur l'amélioration de la qualité des sols et la productivité agricole (Lehmann & Joseph, 2015).

Le biochar est un matériau carboné obtenu par pyrolyse de biomasse dans des conditions limitées en oxygène (Lehmann & Joseph, 2015). Ce processus permet de produire un composé stable, riche en carbone, caractérisé par une structure poreuse et une surface spécifique élevée. Les propriétés du biochar dépendent de la nature de la biomasse utilisée ainsi que des conditions de pyrolyse, notamment la température, qui influence sa stabilité e sa capacité d'adsorption (Lehmann & Joseph, 2015 ; Tan *et al.,* 2015).

Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, le biochar contribue à améliorer significativement la qualité du sol (Aranda *et al.,* 2016). Sa porosité élevée favorise la rétention de l'eau, ce qui est particulièrement bénéfique dans les zones arides et semi-arides. De plus, sa capacité d'échange cationique permet de retenir les nutriments et de limiter leur lixiviation (Laird, 2008). Son caractère alcalin contribue également à corriger l'acidité des sols, améliorant ainsi la disponibilité des éléments nutritifs (Laird, 2008). Par ailleurs, sa composition, dominée par le carbone (70 à 90 %) et enrichie en éléments minéraux tels que le calcium, le potassium et le phosphore, renforce son rôle dans l'amélioration de la fertilité du sol (Lehmann *et al.,* 2006). En conséquence, l'application du biochar permet d'augmenter le carbone organique, de stimuler l'activité microbienne et d'améliorer la structure du sol (Glaser *et al.,* 2002). Ces caractéristiques en font de ce fertilisant un outil prometteur pour le développement d'une agriculture durable et résiliente face aux changements climatiques (Sohi *et al.,* 2010).

Cependant, il convient de souligner que l'application du biochar dans des sols déjà alcalins, comme ceux de la région de Tébessa, peut accentuer le problème d'alcalinité. En effet, étant donné que ces sols présentent naturellement un pH alcalin, l'apport de cet amendement risque d'amplifier cette caractéristique, ce qui peut constituer une contrainte majeure pour la disponibilité des nutriments et, par conséquent, pour la croissance des plantes.

Récemment, les progrès scientifiques ont permis le développement du nanobiochar, une forme innovante de biochar classique produite à l'échelle nanométrique. Cette réduction de taille

s'accompagne d'une augmentation notable de la surface spécifique ainsi que de la réactivité du matériau (Zhang *et al.,* 2020). De ce fait, le nano biochar présente une capacité d'adsorption accrue et interagit plus efficacement avec les constituants du sol. Par ailleurs, sa meilleure dispersion dans le milieu édaphique renforce son efficacité dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol (Zhou *et al.,* 2019).

L'utilisation du nano biochar aussi permet d'améliorer la disponibilité des nutriments, de stimuler l'activité microbienne et d'optimiser la structure du sol. De plus, il joue un rôle important dans la réduction de la mobilité des contaminants, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité environnementale des sols (Zhang *et al.,* 2020). Toutefois, à l'instar du biochar, et en raison de sa composition similaire, le nano biochar peut également induire une augmentation de l'alcalinité du sol, notamment dans les milieux déjà alcalins (Shafiq *et al.,* 2023).

En outre, d'autres résidus organiques peuvent être valorisés dans le cadre d'une gestion durable des sols. La margine, sous-produit liquide issu de l'extraction de l'huile d'olive, en est un exemple significatif. Elle se caractérise par une charge organique élevée et une composition riche en composés phénoliques, acides organiques et éléments minéraux (Azbar *et al.,* 2004). Elle contient notamment des quantités importantes de carbone, de potassium et d'azote, ce qui en fait une source potentielle d'amendement organique. L ‘apport des margines au sol diminue l’alcalinité des sols (Ramzan *et al.,* 2021 ; Aranda *et al.,* 2016).

Cependant, la margine doit être utilisée de manière contrôlée en raison de certaines caractéristiques physico-chimiques pouvant influencer négativement les propriétés du sol (Mekki *et al.,* 2013), une utilisation contrôlée de la margine peut améliorer la fertilité du sol.

Dans la même optique de valorisation des déchets organiques, le marc de café constitue aussi une ressource intéressante. Ce résidu, issu de l’infusion du café, est riche en matière organique et en nutriments essentiels, notamment l’azote, le potassium et le phosphore (Mussatto *et al.,* 2011). Le marc de café contient également certains composés organiques susceptibles d’influencer l’activité biologique du sol (Campos-Vega *et al.,* 2015).

Le marc de café se caractérise par une texture fine, une capacité de rétention d'eau modérée et un pH légèrement acide, ce qui favorise le développement des microorganismes du sol (Hardgrove & Livesley, 2016). Son incorporation dans le sol permet d'améliorer la structure, d'augmenter la matière organique et de diminuer le pH comme les margines (Hardgrove & Livesley, 2016).

Dans ce contexte de dégradation des sols et de recherche de solutions durables, l'utilisation combinée de différents amendements organiques, tels que le biochar, le nanobiochar, la margine et le marc de café, apparaît comme une approche prometteuse. Cette combinaison permet de tirer parti des propriétés complémentaires de chaque amendement, afin d'optimiser l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol.

La combinaison du biochar et sa forme nanométrique (nanobiochar) avec les marcs de café et les margines représente une approche intéressante de valorisation de ces résidus organiques. Sachant que, le biochar, bien qu'il améliore les paramètres de fertilité du sol, il peut induire une augmentation du pH de ce dernier conduisant à une alcalinisation non souhaitée, notamment en milieu semi-aride, l'incorporation des marcs de café et des margines permet de moduler cet effet en apportant une fraction organique plus acide et riche en composés facilement décomposables (Kasongo *et al.,* 2011). Cette combinaison favorise ainsi un meilleur équilibre du pH du sol, tout en stimulant l'activité microbienne et la minéralisation progressive des nutriments Par conséquent, l'association citée avec les résidus organiques (Marc de café et margines) contribue non seulement à limiter l'effet alcalinisant des biochars, mais aussi à maintenir, voire améliorer, la fertilité globale du sol et la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette modeste étude, dont l'objectif est d'analyser l'effet combiné des deux formes de biochar avec les deux résidus organiques, marc de café et les margines.

La présente étude vise à évaluer l'effet de ces différents amendements sur les paramètres de fertilité du sol, notamment le pH, la conductivité électrique, le carbone organique les carbonates, ainsi que les nutriments tels que le phosphore et les nitrates. Elle vise également à comparer l'impact des traitements appliqués, individuellement et en combinaison, en analysant les variations observées avant et après leur application.

Par hypothèse on s'attendra que l'apport du biochar et nanobiochar associé à ces résidus favorisera l'amélioration des paramètres physico-chimiques du sol incluant une diminution dans l'effet d'alcalinité apporté par les biochars. Nous supposons que cet impact sera d'autant plus significatif lorsque ces amendements sont utilisés de manière combinée plutôt qu'isolée.

Ce mémoire s'articule en ces différentes parties

I Introduction.

II Matériels et méthodes.

III Résultats et discussion.

Conclusion.

MATERIEL
ET METHODES

II. MATERIEL ET METHODES

2.1. Localisation de l'essai

L'expérimentation est menée sous serre dans la faculté des sciences exactes et sciences de la nature (Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi, Tébessa) durant l'année 2025-2026. L'objectif de cette étude est de démontrer l'effet de différents amendements organiques, tels que le biochare (BC), le nanobiochare (NBC), le marc de café (MC), et les margines (MG) ainsi d'évaluer l'effet combiné de BC-MC/MG et NBC-MC /MG afin d'identifier l'amendement le plus efficace pour améliorer la fertilité des sols dans les conditions semi-arides.

2 .2. Le dispositif expérimental

L'expérimentation a été conduite dans 27 pots en plastiques semblables de 3Kg de contenance. Afin d'assurer un drainage optimal et d'écarter tout risque d'asphyxie racinaire lié à la compaction du substrat, un lit de gravier, préalablement rincé à l'eau distillée, a été disposé au fond de chaque récipient. L'étude repose sur un facteur « effet amendement », structuré en neuf modalités distinctes. Afin de garantir la fiabilité des résultats, chaque traitement a été réalisé en triplicat (trois répétitions par modalité) selon la répartition suivante :

(i) **Témoin (T) :** Pots de contrôle ne contenant aucun apport extérieur.

(ii) **(BC) :** 5 g/kg de sol.

(iii) **(NBC) :** La dose de 5 g/kg de sol.

(iv) **(MC) :** La dose de 150 g/pot.

(v) **(MG) :** elle a été apportée au sol sous forme d'une dose liquide de 35 ml/pot. Afin d'évaluer d'éventuelles interactions, quatre traitements combinés ont également été testées (B+MC, B+M, NB+MC et NB+M), en associant les deux formes de biochar aux amendements organiques tout en maintenant les dosages initiaux.

2 .3. Les matériaux utilisés

Le sol utilisé dans cette expérimentation a été prélevé dans une terre agricole située dans la région de Boulhef dyr dans la province de Tébessa. Le BC a été acquis auprès d'un fournisseur local ; il a été broyé et tamisé (Ø = 2 mm) avant qu'il ne soit amendé dans les pots. Le NBC a été obtenu après un broyage intense au mortier jusqu'à l'obtention d'une poudre très fine. Le MC a été collecté après utilisation domestique (infusion par cafetière), puis séché à l'air libre afin d'éliminer toute humidité résiduelle et d'éviter le développement de moisissures, avant son usage. Enfin, la margine utilisée provient d'une unité de trituration d'olives de la région. Le sol

et les amendements ont étés soumis à une analyse chimique préalable pour déterminer les caractéristiques chimiques et physiques qui figurent dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Les caractéristiques du sol et les amendements utilisés.

Les paramètres testés	Sol	Biochar	Marc de café	Margine
pH	8,25±0,01	7,21±0,15	6,05±0,04	5,11±0,02
CE µS/cm	609,33±72,47	184,57±1,55	466±22,11	1466±13,23
Carbone %	0,51±0,07	5,24±0,015	10,29±4,88	46,79±0,21
Phosphore	24,14±1,74	23,10±1,02	1,16±0,07	14,86±0,89
Nitrate	3,28±0,72	2,56±0,03	3,04±0,08	2,99±0,06
Texture	Limoneuse	-	-	-

2. 4. Le prélèvement des échantillons de sol

Le prélèvement des échantillons de sol concernant les traitements (BC, NBC, MC, leurs interactions) a été effectué à 18 cm de profondeur des pots, après deux mois de culture, cependant les traitements reliés aux MG le prélèvement du sol a été fait après 23 jours à partir de la date d'apport ce qui correspond au 26 avril 2026. Trois répétitions sont prises pour chaque niveau de traitement. Une fois prélevés, les échantillons sont mis dans des sacs en plastique, séchés à l'étuve à 105°C pendant 24heures. Après tamisage (tamis de 2mm de diamètre), ils ont fait l'objet de quelques analyses physico chimiques.

2.5. Les analyses physico-chimiques du sol

2.5.1. Le pH

Le pH a été déterminé à l'aide du pH-mètre dans une suspension de terre fine après agitation pour une durée de 30mn dans l'eau distillée avec un rapport sol/solution de (1/5 ; w/v) (Mathieu et Pieltain, 2003). Les sols sont classés selon leurs statuts acido-basiques dans le tableau 02.

2.5.2. La conductivité électrique

Comme pour le pH, une solution de sol est obtenue par agitation des échantillons du sol dans l´eau distillée avec le rapport de (1/5 ; w/v). La lecture de la conductivité électrique est établie sur le filtrat sol avec un conductimètre numérique (Mathieu et Pieltain, 2003).

2.5.3. Le calcaire total (TCCE%)

Le calcaire total est l'ensemble du calcaire du sol représenté dans toutes ses formes et tailles, Sa quantité dans le sol peut être déterminée après dissolution avec un acide à concentration moyenne. Le carbone du CaCO3 dans le sol a été attaqué par l'acide chlorhydrique, et ce dosage était basée sur la réaction acido-basique avec de l'acide chlorhydrique dilué au 1/3. Le volume de CO2 dégagé permet de déterminer la quantité de CaCO3.

$$\mathbf{CaCO3 + 2HCl \longrightarrow CaCl2 + CO2}$$

Dans un bécher contenant 10 ml de **HCL** dilué au **(1/3)** de poids connu **(P1)** on ajoute 2g de terre fine. Après agitation, on laisse reposer et la solution est à nouveau pesée pour avoir le poids **(P2)** (Baise, 2000)**.** Le poids de CaCO3 total a ensuite été calculé selon la formule suivante :

Poids du CO_2 dégagé = Poids du bécher + acide + sol (avant la réaction **P1**) – Poids du bécher + acide + sol (après réaction **P2**)

$$\mathbf{\%\ CaCO_3 = Poids\ du\ CO_2\ dégagé\ x\ 2{,}274\ x100/\ Poids\ du\ sol}$$
$$\mathbf{= Poids\ du\ CO_2\ x\ 227{,}4\ /Poids\ du\ sol}$$

2.5.4. Le calcaire actif (ACCE%)

Le calcaire actif a été dosé par la méthode de Drouineau-Galet il est combiné aux oxalates (Mathieu et Pieltain, 2003). Un échantillon de 1 g de sol a été agité pendant une durée de deux heures, dans 100 ml d'une solution d'oxalate 0,2 N. 10 ml du filtrat ont été prélevés dans un bécher contenant 50 ml d'eau distillée et 5 ml d'acide sulfurique concentré ; la solution a été chauffée à 70 C. Après refroidissement, un titrage a été réalisé avec une solution de permanganate de potassium (0,2 N) sur le contenu du bécher jusqu'à obtention d'une couleur rose persistante, puis un volume de titrage (v1) pour l'échantillon de sol a été déterminé. Dans les mêmes conditions, l'opération a été répétée avec le témoin sans terre pour obtenir le volume (v2) (Mathieu et Pieltain, 2003). La classification des sols est basée sur le taux du calcaire actif. En conséquence, la teneur en CaCO3 actif a été calculée selon la formule :

$$\mathbf{\%\ de\ calcaire\ actif = (V' - V)\ x\ 0{,}2N\ x\ 100/10\ x\ 50/1000x100/2}$$
$$\mathbf{= 5\ (V'-V)}$$

V'=Titre du témoin

V=titre de l'échantillon sol

2.5.5. La matière organique

Le carbone organique de chaque échantillon a été dosé selon la méthode Walkley-Black (Baize, 2018). Chaque échantillon de sol a été oxydé par du bichromate de potassium dans un milieu contenant de l'acide sulfurique. Le reste de bichromate non réduit par le carbone organique a ensuite été titré avec une solution de sels de Mohr (sulfate ferreux). Le titrage a été effectué en présence de diphénylamine utilisée comme indicateur coloré qui vire au vert foncé lorsque l'excès de bichromate est complètement réduit. Un témoin sans terre fine a été réalisé dans les mêmes conditions. La teneur en carbone organique a été calculée selon la formule suivante :

$$C\ (\%) = \frac{(Y-X) * 0{,}6mg\ C * 100}{Prise\ du\ sol\ (mg)} = (T'- échant) * 0{,}3 * 1{,}31$$

La teneur de la matière organique est déduite à partir de l'équation : **SOM = C% × 1,724** (Duchraufour, 1997).

2.5.6. Le phosphore assimilable

Une extraction du phosphore assimilable est faite par la méthode de (Olsen et al.,1954) une agitation de 5 g de sol dans 100ml de bicarbonate de sodium (0.5M), à 5ml du filtrat est ajouté 5 ml de molybdate d´ammonium et 1ml de SnCl2. La lecture de l´absorbance des échantillons est faite au spectroscope à une longueur d´onde 660nm. La teneur en phosphore est déduite à partir de la courbe d´étalonnage :

$$Y= 0{,}039X+0{,}00485,\ (R^2=0{,}9984)$$

2.5.7. Les nitrates

L'analyse est faite selon la méthode de (Rodier et al., 2009) (Adamowicz et al.,2018). Chaque échantillon (10g) de sol est agité dans 100ml d'eau distillée pendant 1h. 10 ml du filtrat est prélevé on y ajoute (1ml) de salicylate de sodium. Le résidu obtenu par évaporation à 80°C est repris après refroidissement par 2ml d'acide sulfurique et 15ml d'une solution d'hydroxyde de sodium et tartrate double de sodium et de potassium. Une couleur jaune se développe. La lecture des échantillons est faite à la longueur d'onde 415nm. La teneur des nitrates est déduite par l'équation d'étalonnage suivante :

$$Y= 0.0635X -0.1344,\ (R^2=0\ .9883)$$

2.6. Les analyses statistiques

Les données obtenues de l´expérimentation ont été soumises à des études statistiques qui ont consisté en une série d´analyses de la variance à un seul facteur étudié au niveau alpha = 5%, compléter par une étude comparative de moyenne en utilisant le test de Tukey. Ces analyses ont été effectuées avec le logiciel STATISTICA version 13.0.

RESULTATS ET DISCUSSION

III. Résultats et discussion

L'analyse statistique du potentiel d'hydrogène indique un effet traitement hautement significatif (p<0,001; Tab 02).

Tableau 02 : Résultats de l'ANOVA pour les paramètres du sol.

	df	F	*p*-value	Sig	F	*p*-value	Sig	F	*p*-value	Sig	F	*p*-value	Sig
			pH			CE			TCCE%			ACCE%	
Modalité des traitements	8	19,5	<0,001	***	1006,09	<0,001	***	69,0101	<0,001	***	9,267	<0,001	***
			MO%			Phosphore			Nitrate				
Modalité des traitements	8	22,692	<0,001	***	38,8479	<0,001	***	21,2742	<0,001	***			

df : degrés de liberté, F : F de Fisher-Snedecor, Sig : Signification statistique, *** : p < 0,001, ** : p < 0,01, * : p ≤ 0,05, ns : p > 0,05.

Le traitement du sol par le biochar (BC= 8,71±0,047) et le nanobiochar (NBC= 8,64 ± 0,045) a entraîné une augmentation du pH par rapport au sol témoin (8,29±0,18) (fig. 01). Cette élévation confirme le caractère alcalin de ces amendements ainsi que leur capacité à accroître le pH du sol (El-Shabasy *et al.,* 2025). En effet, le biochar et le nanobiochar présentent généralement une forte teneur en cendres minérales et en carbonates issus du processus de pyrolyse, ce qui favorise l'augmentation du pH du sol (Yuan *et al.,* 2011).

Nepal et al (2023) ont mis en évidence une augmentation du pH dans les sols amendés par le biochar, De même, Debab et al (2024) ont rapporté une élévation du pH dans des sols issus de régions semi-arides après l'application de biochar à une dose de 5 g kg^{-1} de sol. Selon ces auteurs, cette augmentation serait principalement liée à l'accumulation de sels solubles, notamment des ions carbonates, libérés lors de l'amendement du sol par le biochar.

À l'inverse, les traitements à base de marc de café (MC= 8,34±0,01) et de margines (MG= 8,58 ± 0,07) ont montré des valeurs de pH inférieures à celles observées avec le BC et le NBC (fig. 01), Cette diminution relative suggère l'effet légèrement acidifiant de ces deux amendements organiques lié à la libération d'acides organiques au cours de leur décomposition (Babadele *et al.,* 2025), Cependant avec ces traitement le pH du sol reste toujours basique (Baize & Jabiol, 1995).

Les résultats montrent également que l'amendement combiné biochar+margines (BC + MG) présente la plus faible valeur de pH (8,18 ± 0,02) (fig. 01), traduisant une diminution significative de l'alcalinité du sol par rapport au témoin. Cette réduction pourrait être attribuée à l'effet acidifiant des margines, riches en composés organiques et en acides organiques, capables de contrebalancer l'alcalinité généralement induite par le biochar (Babadele *et al.,* 2025).

De même, la combinaison du BC ou du NBC avec le MC a également entraîné une légère diminution du pH (8,42 ± 0,03) (fig. 01) par rapport aux traitements où le BC ou le NBC sont appliqués seuls, Cette observation revient aussi comme pour les MG à la minéralisation de la matière organique contenue dans le marc de café, laquelle stimule l'activité microbienne du sol et modifie les équilibres chimiques, conduisant ainsi à une légère baisse du pH (Hussein *et al.,* 2022).

Le classement des moyennes selon le test de Tukey (annexe 06) a permis de distinguer cinq groupes homogènes, La plus faible valeur de pH a été enregistrée pour le traitement combiné (BC + MG), tandis que les valeurs les plus élevées ont été observées avec les traitements BC et NBC appliqués seuls. Les autres traitements associant le BC ou le NBC au marc de café (MC) ou aux margines (MG) ont présenté des valeurs intermédiaires, ce qui suggère que les amendements organiques modèrent l'augmentation du pH provoquée par le BC et le NBC, Cet effet peut être attribué à la présence de composés organiques capables d'atténuer l'alcalinisation du milieu.

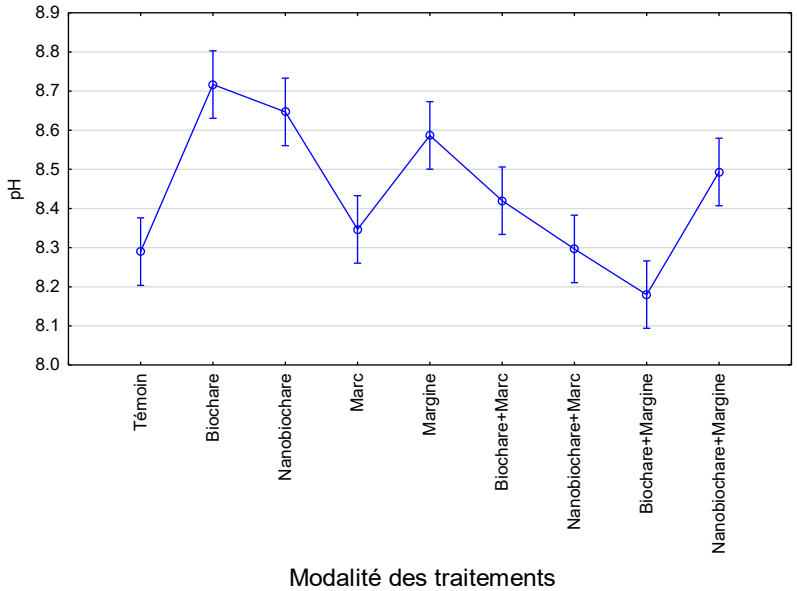


Figure 01 : Effet des traitements sur le pH.

Concernant la variation de la conductivité électrique (CE), les résultats ont montré une variation hautement significative ($p<0,001$; Tab 02) entre les différents traitements, Les plus faibles valeurs ont été enregistrées pour le BC seul (854,33 ± 17,47µS cm^{-1}), le témoin (924±15,87 µS cm^{-1}) et aussi le NBC (986,66±14,57 µS cm^{-1}) (fig. 02), qui appartiennent au même groupe statistique selon le test de Tukey. Ces résultats suggèrent que l'application du BC ou du NBC seuls n'a pas provoqué d'augmentation significative dans la salinité du sol, Cela pourrait s'expliquer par la capacité d'adsorption des ions dissous par ces deux composants, limitant ainsi l'accumulation excessive des sels dans la solution du sol (Peng *et al.,* 2021).

Les traitements combinant le BC, NBC avec le MC ont présenté des valeurs de CE, comprises entre (1029,66 ± 11,01) et 1295± 68,02µS cm^{-1} (fig. 02). Cette augmentation revient à la minéralisation de la matière organique contenue dans le marc de café, entraînant la libération différents éléments minéraux et d'ions solubles dans le sol (Kleber *et al.,* 2021), cette observation se confirme par les résultats de l'analyse des MC qui ont souligné une teneur importante en matières organiques.

En revanche, les traitements à base de margines ont enregistré les valeurs les plus élevées en conductivité électrique, notamment la margine seule (2850±34,64 µS cm^{-1}), la combinaison biochar+margine (3126,66±11,54 µS cm^{-1}) et surtout nanobiochar+margine (4143,33 ±176,16µS cm^{-1}) (fig. 02), ce dernier constituant le groupe statistiquement le plus élevé selon le test de Tukey (annexe 07), Cette augmentation importante de la CE s'explique par la richesse des margines en ions tels que le potassium, le sodium et les chlorures (Cervera-Mata *et al.,* 2023) ; A cet effet comme pour le MC, l'analyse caractéristique faite au laboratoire a montré que les margines ont une CE très élevée indiquent sa richesse en différents sels minéraux. Il est claire dans cette présente étude que l'augmentation de la CE dans les traitements combinés indique un effet de **s**ynergie entre les margines et des matériaux carbonés à forte capacité de rétention ionique (BC et NBC)**,** ce qui a conduit à une accumulation des sels solubles dans le sol et donc à une hausse de la conductivité électrique (Peng *et al.,* 2021), A rajouter aussi, les conditions expérimentales en pots, caractérisées par un faible drainage tous ces facteurs ont probablement contribué à accentuer les valeurs de conductivité électrique observées (Alam *et al.,* 2025), Dans le même sens d'idée Tao et al (2023) rapportent que, BC et particulièrement le NBC ont également favorisé la rétention des ions dans le sol en raison de leur grande surface

spécifique et de leur forte capacité d'échange, ce qui accentue la concentration en sels solubles dans la solution du sol.

Le classement statistique obtenu par le test de Tukey (annexe 07) met en évidence une augmentation progressive de la CE selon la nature des amendements appliqués, Contrairement à l'hypothèse initiale posée dans cette étude, l'association MG et BC et NBC a entraîné une augmentation de la conductivité électrique traduisant une accumulation des sels solubles dans le sol, Cet effet est attribué à la forte teneur des margines en ions solubles comme il a été mentionné ainsi qu'à la minéralisation rapide de la matière organique après un mois d'amendement (Touahar & Stout, 2022), libérant davantage d'ions dans la solution du sol.

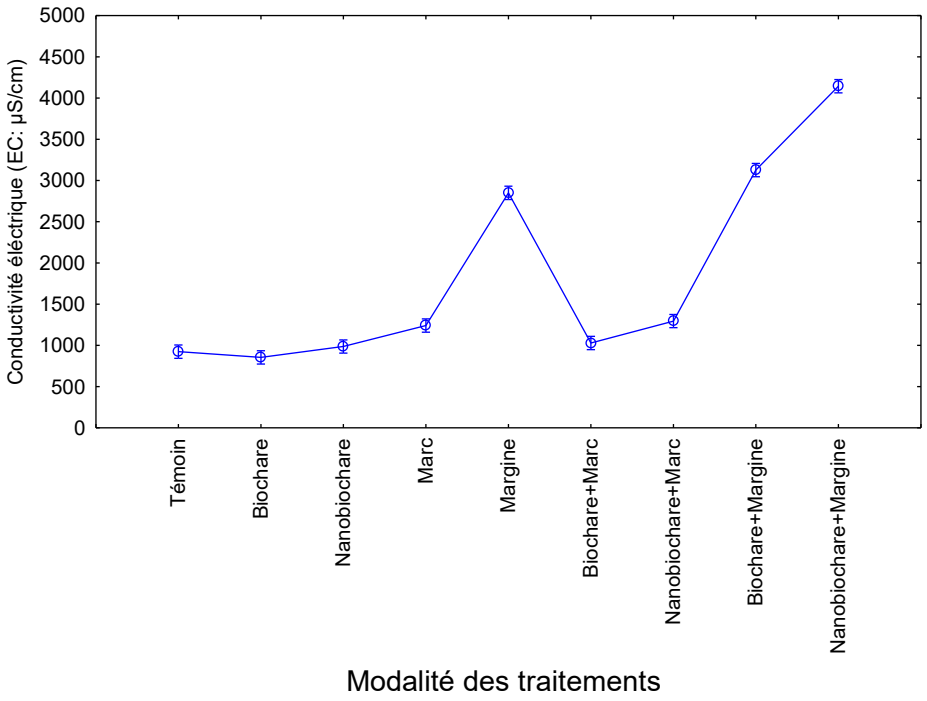


Figure 02 : Effet des traitements sur la conductivité électrique.

L'analyse des résultats relatifs à la teneur en matière organique (MO) montre un effet hautement significatif ($p < 0,001$; Tab 02) des différents traitements appliqués au sol, Le test de Tukey a mis en évidence trois groupes (annexe 08), traduisant une variation importante de l'accumulation de la matière organique selon la nature des amendements utilisés. Les teneurs varient entre des valeurs moyennes et riches (Baize, 2000).

Le témoin a présenté la plus faible teneur en MO (2,07 ±1,38 %), La plus haute teneur en MO est allouée au traitement biochar (6,98±0,78%) qui se classe dans un groupe supérieur par

rapport à tous les autres niveaux de traitements (fig. 03), A cet effet il est apporté par plusieurs auteurs (Ababsa *et al.,* 2023) que le biochar seul est une matière très stable et riche en carbone. Il se décompose lentement, ce qui favorise l'accumulation et la stabilisation durable du carbone organique dans le sol, Cependant, les traitements associant le biochar avec le MC ou la MG (Biochar + Marc et Biochar + Margine) ont entraîné une très légère augmentation de la MO (2,70 ± 0,27 %) (fig. 03) qui est non significative par rapport au témoin, suggérant un apport organique modéré, Il est clair que, l'association des margines avec le BC n'a pas amélioré davantage la matière organique (MO) du sol par rapport aux traitements appliqués séparément. Cette observation trouve son explication dans la faite que, les MG et MC contiennent des composés phénoliques et des sels solubles pouvant perturber l'activité microbienne et limiter l'humification, réduisant ainsi la stabilisation du carbone organique dans le sol (De Cauwer *et al.,* 2006).

Le traitement au MC seul (3,15±0,43%) a montré une amélioration plus marquée dans la teneur en matière organique. Le marc de café constitue une source importante de carbone organique biodégradable et contient des composés organiques facilement décomposables qui stimulent l'activité microbienne du sol, cette biodégradation favorise l'accumulation de la matière organique dans le sol (Simoes *et al.,* 2020).

Les traitements à base de NBC ont présenté des valeurs encore plus élevées, Le NBC seul (4,69±1,01%) et surtout l'association NBC + Marc (5,00±0,35%) (fig. 03) ont significativement amélioré la teneur en matière organique par rapport au témoin, rendant les sols amendés riche en matière organique (Baize, 2000), Cette augmentation peut être attribuée à la très grande surface spécifique du NBC et à sa forte capacitée d'adsorption, permettant une meilleure stabilisation du carbone organique dans le sol (Zhang *et al.,* 2020). De plus, la combinaison du NBC avec le MC apporte une fraction organique facilement assimilable, avec le NBC qui limite les pertes de carbone par minéralisation rapide (Xie *et al.,* 2025), Tous ces facteurs jouent un rôle positif dans l'amélioration de la MO du sol pour ces traitements.

En consultant les valeurs obtenues il se dégage aussi que, les teneurs les plus élevées en matière organique du sol ont été observées avec la margine seule (6,89±0,13 %) (fig. 03), Cette forte teneur obtenue avec la margine s'explique par sa richesse en composés organiques dissous, notamment les acides organiques et les résidus carbonés issus des olives (Okur *et al.,* 2026).

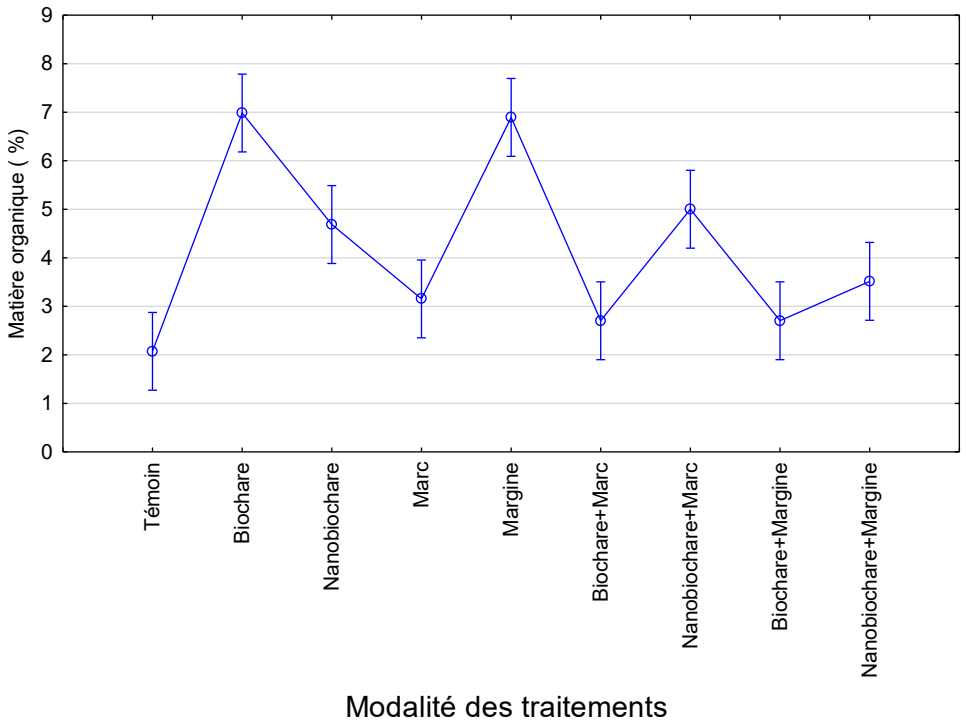


Figure 03 : Effet des traitements sur la teneur de la matière organique.

Au regard des résultats obtenus à partir de l'analyse statistique du calcaire actif, l'ANOVA indique une variation hautement significative ($p < 0,001$; Tab 02), Les teneurs enregistrées correspondent à des niveaux variant de faibles à moyens (Baize, 2000).

Le test de Tukey indique que la plus faible teneur (3±0,86%) appartient au sol témoin, alors que la valeur la plus élevée (8,66±1,04%) (fig. 04) est celle du traitement BC seul (annexe 09). L'augmentation observée du calcaire actif avec le BC s'explique par sa richesse en cendres minérales et en composés alcalins contenant du calcium et du magnésium (Lehmann *et al.,* 2006), Contrairement à nos résultats Boudjabi et al, (2023) ont rapporté aussi une diminution dans la teneur du calcaire actif dans un sol semi-aride mendé par le biochar à une teneur de 8,78 ±1,43% en comparaison avec le sol témoin (15,69 ± 4,03 %). Le NBC présente également une augmentation importante du calcaire actif avec la teneur (7,66±0,28 %) (fig. 04) en raison de sa surface spécifique élevée et de sa plus grande réactivité chimique (Bilge *et al.,* 2025) et ses propriétés chimiques qui favorisent les interactions entre les carbonates, les colloïdes du sol et les éléments minéraux, ce qui peut accélérer les phénomènes de stabilisation du calcium actif dans le sol (Salaria *et al.,* 2024).

Concernant le MC, seul ou associé au BC, les teneurs relativement élevées (7,5±1% et 5,33±0,28%) (fig. 04) peuvent être attribuées à la minéralisation progressive de la matière organique et à la libération d'éléments basiques durant la décomposition, Toutefois, l'effet reste inférieur à celui du biochar seul, parce que le MC contient également des composés organiques susceptibles de produire des acides organiques au cours de leur dégradation, limitant partiellement l'accumulation du calcaire actif (Hu *et al.,* 2024).

L'effet combiné entre les autres traitements associant BC ou NBC avec les margines montrent des valeurs intermédiaires (6,66±1,04, et 6,66 ±1,60%) (fig. 04), cette légère diminution par rapport au biochars seul est liée à la présence de composés organiques acides et phénoliques dans les margines, capables de complexer temporairement certains ions calcium ou de modifier les équilibres carbonatés du sol (Okur *et al.,* 2026), Cependant, malgré cela, les valeurs restent supérieures au témoin, indiquant un effet global alcalinisant des amendements BC et NBC.

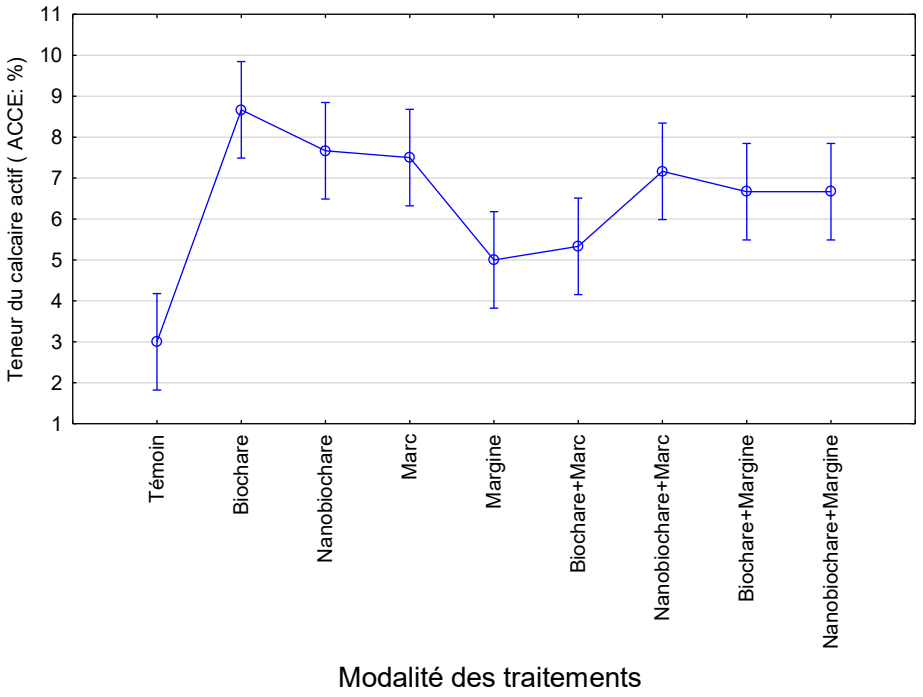


Figure 04 : Effet des traitements sur la teneur du calcaire actif.

Les résultats relatifs au calcaire total indiquent un effet hautement significatif ($p<0,001$; Tab 02). Les sols traités par le BC (43,89±3,46 %) et NBC (54,43± 6,89%) (fig. 05) sont fortement calcaires (Baize & Jabiol, 1995) ce qui confirme que ces deux composants agissent par leur comportement alcalinisant à augmenter l'alcalinité du sol (Lehmann *et al.,* 2006), La teneur la plus faible est allouée au sol témoin (6,04±0,82%) (fig. 05).

Lorsque le MC et les MG sont appliqués seuls, ils montrent également une légère augmentation du calcaire total par rapport au témoin. Cet effet s'explique principalement par la minéralisation de la matière organique, entraînant une libération modérée de cations basiques, avec un impact moins marqué que celui du biochar.

Concernant l'effet combiné des traitements, les associations BC ou NBC avec les margines ou le MC les teneurs en calcaire total sont nettement inférieures à celles obtenues avec le BC, NBC seuls. Comme il a été mentionné cette diminution est attribuée à l'apport de matières organiques fraîches issues de MC ou MG riches en composés acides qui, au cours de leur décomposition, libèrent des acides organiques et du CO_2 capables de modifier les équilibres carbonatés du sol et de limiter partiellement l'accumulation du calcaire total (Okur *et al.,* 2026).

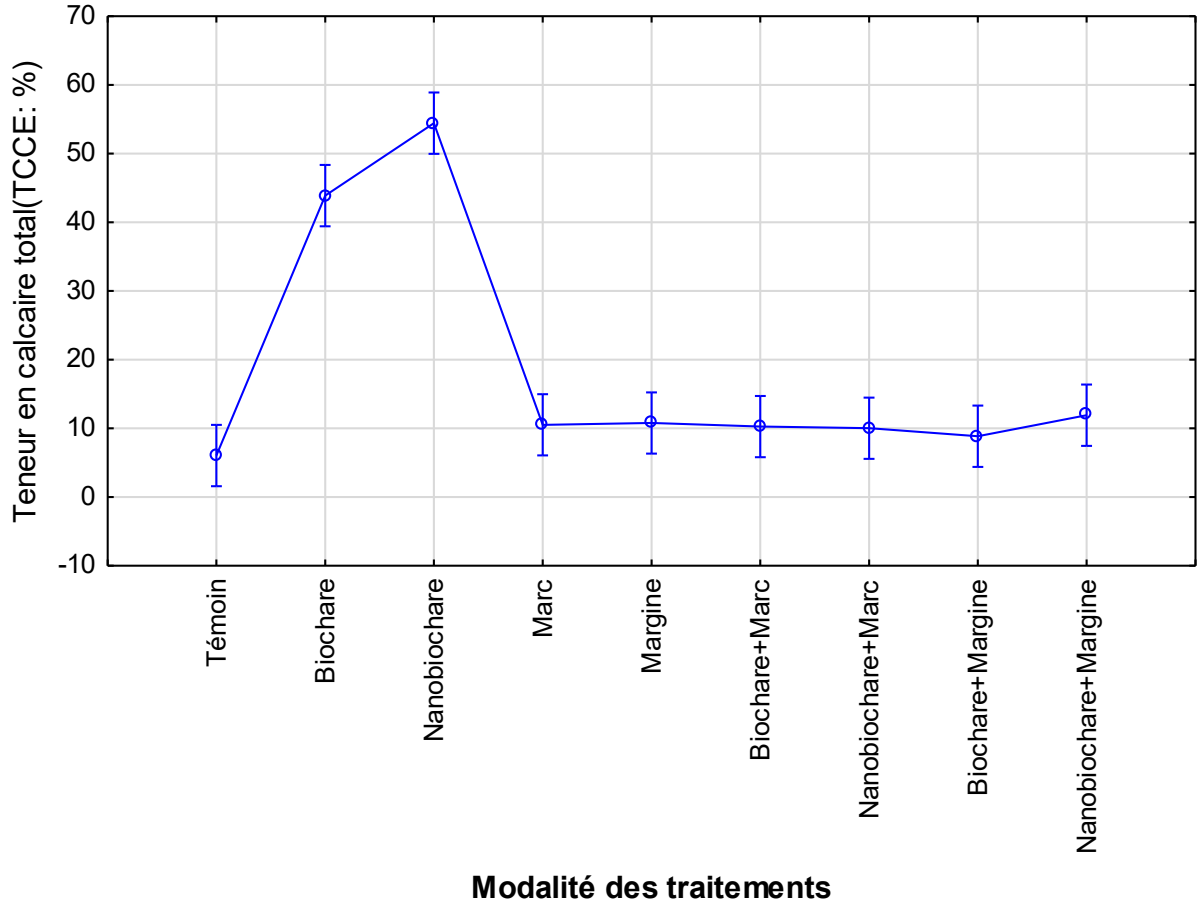


Figure 05 : Effet des traitements sur la teneur du calcaire total.

Les résultats relatifs au phosphore assimilable montrent des différences très hautement significatives ($p<0,001$; Tab 02) entre les traitements appliqués au sol, Le témoin présente la

teneur la plus élevée en phosphore assimilable (17,10±1,49µg/g de sol), suivi du NBC (15,32±2,85µg/g de sol) puis du BC (8,09±1,60µg/g de sol) (fig. 06).

À l'inverse, les traitements à base de margines, seules ou associées aux BC et NBC, enregistrent les valeurs les plus faibles, comprises entre (3,05±0,70µg/g de sol et (4,38±1,52µg/g de sol). (fig. 06). Le marc de café seul présente une valeur intermédiaire (7,20±1,96µg/g de sol), tandis que son association avec le BC ou le NBC entraîne également une diminution du phosphore disponible aux teneurs respectives de (3,49±0,11µg/g de sol et 3,06±0,17µg /g de sol) (fig. 06).

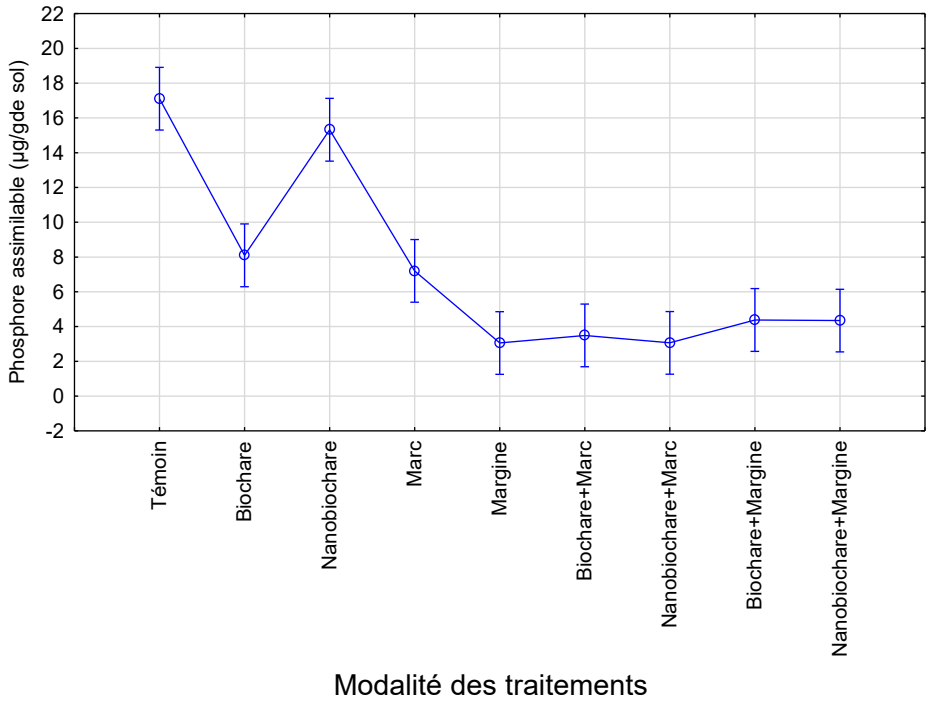


Figure 06 : Effet des traitements sur la teneur du phosphore assimilable.

Le biochar seul améliore relativement la disponibilité du phosphore par rapport aux traitements combinés. Cette amélioration peut s'expliquer par sa forte porosité et sa capacité à adsorber certains ions responsables de la fixation du phosphore, Cependant, la valeur reste inférieure au témoin, ce qui suggère qu'une partie du phosphore peut également être retenue à la surface du biochar, surtout dans les sols riches en calcium, Aussi il est observable que le NBC présente un effet plus favorable à celui du BC, Ceci s'explique par la faite que ce dernier présente une surface spécifique plus élevée et sa réactivité accrue peuvent améliorer la rétention des nutriments et favoriser une meilleure dynamique du phosphore dans le sol, Cela expliquerait les teneurs relativement élevées observées avec ce traitement (Abed Hussein *el al.,* 2022).

Concernant le MC, la diminution du phosphore assimilable dans les traitements combinés s'explique par l'alcalinité du sol observe. En effet, dans les sols calcaires ou alcalins, les acides organiques libérés durant la décomposition du MC peuvent réagir avec le calcium et entraîner la précipitation du phosphore sous des formes moins assimilable s (Cervera-Mata *et al.,* 2018). Dans les sols calcaires ou alcalins, ces conditions favorisent souvent la précipitation du phosphore sous forme de phosphates de calcium peu solubles, réduisant ainsi sa disponibilité pour les plantes.

Aussi la réduction du phosphore assimilable dans les traitements contenant des margines peut-être liée à plusieurs mécanismes physicochimiques, les margines sont riches en sels minéraux et certains composés phénoliques qui peuvent inhiber l'activité microbienne responsable de la minéralisation du phosphore organique (Dakhli, 2017).

L'ANOVA relative aux résultats des nitrates dans le sol révèle un effet hautement significatif des traitements appliqués ($p < 0,001$; Tab 02), le classement statistique des moyennes selon le test de Tukey met en évidence cinq groupes homogènes (annexe 12), les traitements associant le marc de café au NBC ou au BC présentent les teneurs les plus faibles en nitrates, les teneurs respectives sont (0,31 ± 0,02 mg/g de sol et 0,41 ± 0,11 mg/g de sol, puis du Marc seul avec 0,92 ± 0,22 mg/g de sol (fig. 07).

La diminution observée s'explique par un effet d'immobilisation de l'azote minéral par les microorganismes existant dans le sol. L'apport du MC au sol contribue par la matière organique qu'il contient à stimuler l'activité des microorganismes qui utilisent alors les nitrates du sol, réduisant ainsi la quantité de ce minéral dans la solution sol (Simoes *et al.,* 2020).

Il semble que, la combinaison du MC avec le NBC réduit fortement les nitrates, indiquant que l'effet d'immobilisation microbienne domine malgré les propriétés amélioratrices du nanobiochar.

Les traitements BC+MG (1,38±0,09), BC seul (1,48±0,05) et MG (1,84 ± 0,05 mg/g de sol) présentent des teneurs intermédiaires (fig. 06). En comparaison avec les valeurs du témoin il est clair que le BC et MG ont induit une diminution dans la teneur des nitrates, Cet effet revient à l'adsorption de ce minéral dans la matière organique contenu dans ces amendements (BC+ MG) (Pérez-Burillo *et al.,* 2022). Il semble que cet effet est plus déterminant lorsque le BC est associé au MG car c'est un effet synergétique.

Les teneurs des nitrates les plus élevées sont observées dans le Témoin (2,79 ± 0,40 mg/g de sol), NBC+MG (2,87±0,07mg/g de sol) et surtout NBC seul (3,09± 1,07 mg/g de sol) (fig. 07). Le nanobiochar semble donc favoriser davantage la disponibilité des nitrates plus que le biochar classique, Cette amélioration peut être liée à sa très grande surface spécifique et à sa forte réactivité, qui stimulent les échanges ioniques et améliorent les conditions du sol pour l'activité microbienne responsable de la nitrification (Shafiq *et al.,* 2023). Concernant l'association NBC+MG maintient également une teneur élevée, suggérant une interaction positive entre le NBC et les composés organiques des margines.

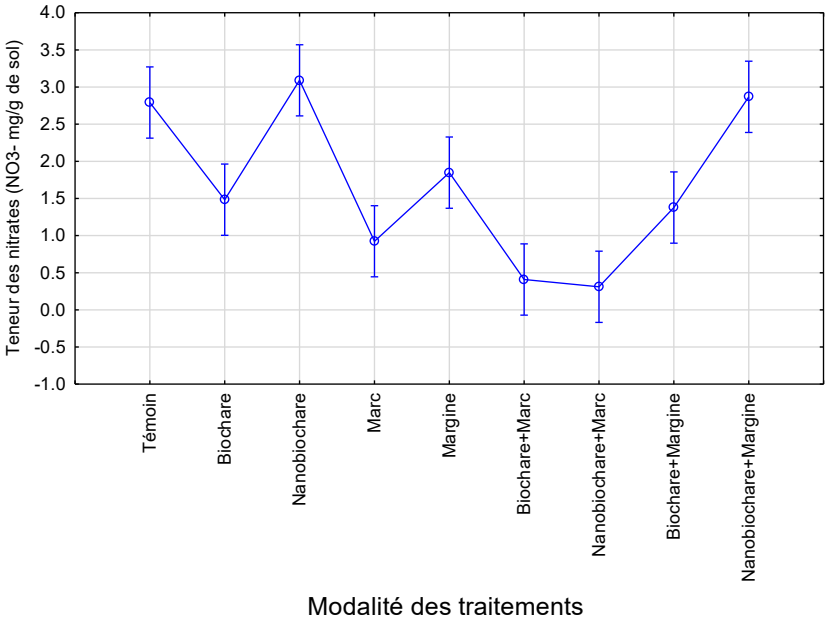


Figure 07 : Effet des traitements sur la teneur des nitrates.

CONCLUSION

Conclusion

En conclusion, l'ensemble des résultats obtenus montre que les amendements étudiés influencent fortement les propriétés physico-chimiques du sol, avec des effets variables selon la nature des matériaux appliqués et leurs associations. Le (BC) et (NBC) ont exercé un effet alcalinisant marquer, traduisant une augmentation du pH, du calcaire actif et total ainsi qu'une amélioration importante de la matière organique du sol.

Le MC et les MG, ont contribué à libérer des composés organiques et des acides organiques qui ont modéré l'alcalinisation induite par le BC et le NBC. Cependant, les margines ont entraîné une augmentation importante dans la conductivité électrique du sol.

L'amélioration de la matière organique observée avec le BC, le NBC et certains traitements combinés confirme également leur intérêt pour la restauration de la fertilité des sols pauvres en carbone organique. En revanche, la diminution du phosphore assimilable dans plusieurs traitements suggère que les conditions alcalines et calcaires du ont induit une précipitation du de ce minéral qui devient peu disponibles pour les plantes.

Concernant les nitrates le NBC constitue le traitement le plus favorable à l'augmentation de ce minéral dans le sol, tandis que les traitements contenant du MC et MG tendent à le réduire.

Au regard de ces résultats, il est recommandé de prolonger la durée de suivi après application et d'évaluer la distribution des sels sur l'ensemble du profil du sol, notamment dans des conditions de plein champ, afin d'obtenir une appréciation plus représentative du comportement des sels, en prenant en compte aussi l'effet cumulé de ces amendements mais à différentes doses.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

~ *A* ~

Ababsa, N., Boudjabi, S., & Chenchouni, H. (2023). Biochar amendments changed soil properties and improved cereal crop growth under salt stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(4), 4912-4925.

Abed Hussein, B., Mahdi, A. B., Emad Izzat, S., Acwin Dwijendra, N. K., Romero Parra, R. M., Barboza Arenas, L. A., ... & Thaeer Hammid, A. (2022). Production, structural properties nano biochar and effects nano biochar in soil: a review. *Egyptian Journal of Chemistry*, *65*(12), 607-618.

Alam, F., Li, Y., Salman, A., Shahid, R., & Munif, A. (2025). Comparison of Groundwater Table Depth, Drainage Coefficient, and the Determination of Nutrient Losses in the Salinity Control and Reclamation Project (SCARP) Mardan, Pakistan. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *25*(2), 2465-2478.

Aranda, V., Ayora-Cañada, M. J., Domínguez-Vidal, A., Martín-García, J. M., Calero, J., Delgado, R., & Verdejo, T. (2016). Effect of biochar application on soil quality indicators. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 16(4), 829–842.

Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hipps, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. Plant and Soil, 337, 1–18.

Azbar, N., Bayram, A., Filibeli, A., Muezzinoglu, A., Sengul, F., & Ozer, A. (2004). A review of waste management options in olive oil production. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 34(3), 209–247.

~ *B* ~

Baize, D. & Jabiol, B. 1995. Guide pour la description des sols : techniques et pratiques. INRA. Paris, 375 p.

Baize, D. (2000). Guide des analyses en pédologie. INRA Editions, Paris.

Bilge, U., Rajput, V. D., Eren, A., Yalcin, M., Habib, Y., & Faizan, M. (2025). Unveiling the ameliorative effects of soil-mediated nano-biochar and calcium oxide nanoparticles on drought tolerance in Oryza sativa: insights into biochemical responses, reactive oxygen species,

photosynthetic pigments and nutrient homeostasis. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 1-23.

Boudjabi, S., Ababsa, N., & Chenchouni, H. (2023). Enhancing soil resilience and crop physiology with biochar application for mitigating drought stress in durum wheat (Triticum durum). *Heliyon*, *9*(12).

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). The Nature and Properties of Soils (15th ed.). Pearson Education.

~ *C* ~

Cervera-Mata, A., Pastoriza, S., Rufián-Henares, J. Á., Párraga, J., Martín-García, J. M., & Delgado, G. (2018). Impact of spent coffee grounds as organic amendment on soil fertility and lettuce growth in two Mediterranean agricultural soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *64*(6), 790-804.

Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. Trends in Food Science & Technology, 45(1), 24–36.

~ *D* ~

Dakhli, R. (2015). Effet des margines sur les propriétés chimiques du sol et sur le rendement d'une culture d'orge en zones arides (Thèse de doctorat, Institut des Régions Arides & Institut National Agronomique de Tunisie).

Debab, A., et al. (2024). Effects of biochar and microplastics on soil properties and barley (Hordeum vulgare) under water stress conditions. Chemosphere, 368, 143760.

De Cauwer, B., Reheul, D., Nijs, I., & Milbau, A. (2006). Effect of margin strips on soil mineral nitrogen and plant biodiversity. *Agronomy for sustainable development*, *26*(2), 117-126.

~ *H* ~

Hu, Y., Li, J., Wu, Y., Zhang, D., Qi, Z., & Yang, R. (2024). Spent coffee ground and its derivatives as soil amendments—impact on soil heath and plant production. *Agronomy*, *15*(1), 26.

Haddouche, D. (2009). La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride et semi-aride en Algérie : cas de la région de Naâma (Thèse de doctorat). Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Algérie.

Hardgrove, S. J., & Livesley, S. J. (2016). Applying spent coffee grounds directly to urban agriculture soils greatly reduces plant growth. Urban Forestry & Urban Greening, 18, 1–8.

~ *G* ~

Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. Biology and Fertility of Soils, 35, 219–230.

~ *K* ~

Kasongo, R. K., Verdoodt, A., Kanyankagote, P., Baert, G., & Van Ranst, E. (2011). Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for sandy soils in humid tropical environments. Soil Use and Management, 27(1), 94–102.

Kleber, M., Nico, P. S., Plante, A. F., Filley, T., Kramer, M., Swanston, C., & Sollins, P. (2011). Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically recalcitrant. Nature Geoscience, 4, 529–532.

~ *L* ~

Laird, D. A. (2008). The charcoal vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. Agronomy Journal, 100(1), 178–181.

Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. Food and Energy Security, 5(4), 212–222.

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation (2nd ed.). Routledge.

Lehmann, J. (2006). Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – A review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11, 403–427.

~ *M* ~

Mekki, A., Dhouib, A., & Sayadi, S. (2013). Effects of olive mill wastewater application on soil properties and plants growth. International Journal of Environmental Science and Technology, 10, 229–236.

Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. Food and Bioprocess Technology, 4, 661–672.

Mathieu, C., & Pieltain, F. (2003). Analyse chimique des sols : méthodes choisies. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

~ *N* ~

Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2022). Soil Health Technical Note. United States Department of Agriculture (USDA).

Neffar, S., Chenchouni, H., Beddiar, A., & Redjel, N. (2011). Rehabilitation of degraded rangeland in drylands of Algeria. Journal of Arid Environments, 75(10), 1013–1018.

~ *R* ~

Ramzan, M., Khalid, M., & Ahmad, H. R. (2021). Organic amendments improve soil fertility and reduce alkalinity in calcareous soils. Sustainability, 13(4), 2.

Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). L'analyse de l'eau (9th édition). Dunod.

~ O ~

Okur, N., Ates, F., Kayıkçıoğlu, H. H., Kuştutan, F., Merken, Ö., Hatterman-Valenti, H., & Kaya, O. (2026). Long-term impacts of no-till and organic material applications on soil biological indicators in organic vineyards. *BMC Plant Biology*, *26*(1), 81.

~ P ~

Pérez-Burillo, S., Cervera-Mata, A., Fernández-Arteaga, A., Pastoriza, S., Rufián-Henares, J. Á., & Delgado, G. (2022). Why should we be concerned with the use of spent coffee grounds as an organic amendment of soils? A narrative review. *Agronomy*, *12*(11), 2771.

Peng, X., Ye, L. L., Wang, C. H., Zhou, H., & Sun, B. (2011). Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. Soil and Tillage Research, 112(2), 159–166

~ S ~

Salaria, M., Shobhna, S., Sharma, T., Banik, D., Mehta, C. M., Assouguem, A., & Lahlali, R. (2024). Nanobiochar application and its impact on sustainable agriculture: a concise review. *CABI Reviews*, *19*(1).

Simões, M. L., Madari, B. E., & Rosolem, C. A. (2020). Biochar application improves soil organic matter and microbial activity. Agriculture, Ecosystems & Environment, 300, 107012.

Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. Advances in Agronomy, 105, 47-82.

~ T ~

Tao, R., Zhang, Y., Yang, J., Yang, T., White, J. C., & Shen, Y. (2023). Biochar nanoparticles alleviate salt stress in tomato (Solanum lycopersicum) seedlings. *Environmental Science : Nano*, *10*(7), 1800-1811.

Touahar, A., & Stout, A. (2022). Valorisation des margines dans la région de Fes. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, *35*(2), 209-234.

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. Chemosphere, 125, 70–85.

~ *X* ~

Xie, Y., Bai, T., Zhang, Y., Sun, B., Gao, M., & Feng, H. (2025). Nano biochar enhances organic carbon accumulation, molecular complexity, and salt leaching in saline–alkali soil columns. Journal of Environmental *Management*, *389*, 126205.

~ *Y* ~

Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3), 3488-3497. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018

~ *Z* ~

Zhang, P., Sun, H., Yu, L., & Sun, T. (2020). Adsorption and remediation of organic pollutants using biochar and nano-biochar. Chemosphere, 241, 125–132.

Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A. R., Fang, J., Sun, Y., & Cao, X. (2019). Sorption of heavy metals on chitosan-modified biochars and its biological effects. Chemical Engineering Journal, 231, 512–518.

ANNEXES

Annexe 01 : Classes des sols selon leurs statut acido-basique

pH	Interprétation
<5	Fortement acide
5-6	Franchement acide
6-6,6	Légèrement acide
6,6-7,4	Neutre
7,4-7,8	Légèrement alcalin
>7,8	Alcalin

Annexe 02 : Classes des sols selon la CE

CE (µS/cm)	Interprétation
<600	Non salé
600-1000	Légèrement salé
1000-2000	Salé
2000-3000	Très salé
3000-4000	Extrêmement salé

Annexe 03 : Classes des sols selon le taux du calcaire total (GEPPA in Baize, 2000)

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

Annexe 04 : Classes des sols selon le taux du calcaire actif

Calcaire actif (%)	Interprétation
<5	Faible
5-10	Assez élevé
10-20	Elevé
>20	Très élevé

Annexe 05 : Classification des sols selon le taux de matière organique (Schaefer, 1975)

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

Annexe 06 : Classement des traitements en groupe selon Tukey HSD pour le pH.

Tukey HSD test; variable pH (Classeur kenza corrigé 1)
Homogenous Groups, alpha = .05000
Error: Between MS = .00506, df = 18.000

Cell No.	modalité	pH Mean	1	2	3	4	5
8	Biochare+Margine	8.180000		****			
1	Témoin	8.290000	****	****			
7	Nanobiochare+Marc	8.296667	****	****			
4	Marc	8.346667	****	****			
6	Biochare+Marc	8.420000	****		****		
9	Nanobiochare+Margine	8.493333	****		****	****	
5	Margine	8.586667			****	****	****
3	Nanobiochare	8.646667				****	****
2	Biochare	8.716667					****

Annexe 07 : Classement des traitements en groupe selon Tukey HSD pour la conductivité.

Tukey HSD test; variable CE(µS) (Classeur kenza corrigé 1)
Homogenous Groups, alpha = .05000
Error: Between MS = 4409.7, df = 18.000

Cell No.	modalité	CE(µS) Mean	1	2	3	4	5
2	Biochare	854.333	****				
1	Témoin	924.000	****				
3	Nanobiochare	986.667	****				
6	Biochare+Marc	1029.667	****				
4	Marc	1241.000		****			
7	Nanobiochare+Marc	1295.000		****			
5	Margine	2850.000			****		
8	Biochare+Margine	3126.667				****	
9	Nanobiochare+Margine	4143.333					****

Annexe 08 : Classement des traitements en groupe selon Tukey HSD pour la matière organique.

Tukey HSD test; variable SOM% (Classeur kenza corrigé 1)
Homogenous Groups, alpha = .05000
Error: Between MS = .43729, df = 18.000

Cell No.	modalité	SOM% Mean	1	2	3
1	Témoin	2.072944	****		
6	Biochare+Marc	2.703840	****		
8	Biochare+Margine	2.703840	****		
4	Marc	3.154480	****	****	
9	Nanobiochare+Margine	3.514992	****	****	
3	Nanobiochare	4.686656		****	
7	Nanobiochare+Marc	5.002104		****	
5	Margine	6.894792			****
2	Biochare	6.984920			****

Annexe 09 : Classement des traitements en groupe selon Tukey HSD pour le calcaire actif.

Tukey HSD test; variable ACCE % (Classeur kenza corrigé 1)
Homogenous Groups, alpha = .05000
Error: Between MS = .94444, df = 18.000

Cell No.	modalité	ACCE % Mean	1	2	3
1	Témoin	3.000000			****
5	Margine	5.000000	****		****
6	Biochare+Marc	5.333333	****		****
9	Nanobiochare+Margine	6.666667	****	****	
8	Biochare+Margine	6.666667	****	****	
7	Nanobiochare+Marc	7.166667	****	****	
4	Marc	7.500000	****	****	
3	Nanobiochare	7.666667	****	****	
2	Biochare	8.666667		****	

Annexe 10 : Classement des traitements en groupe selon Tukey HSD pour le calcaire total.

Tukey HSD test; variable TCCE% (Classeur kenza corrigé 1)
Homogenous Groups, alpha = .05000
Error: Between MS = 13.535, df = 18.000

Cell No.	modalité	TCCE% Mean	1	2	3
1	Témoin	6.04126	****		
8	Biochare+Margine	8.85934	****		
7	Nanobiochare+Marc	10.02314	****		
6	Biochare+Marc	10.26474	****		
4	Marc	10.52104	****		
5	Margine	10.78634	****		
9	Nanobiochare+Margine	11.92334	****		
2	Biochare	43.89638		****	
3	Nanobiochare	54.43956			****

Annexe 11 : Classement des traitements en groupe selon Tukey HSD pour le phosphore.

Tukey HSD test; variable Phosphoreµg/gde sol (Classeur kenza corrigé 1)
Homogenous Groups, alpha = .05000
Error: Between MS = 2.2091, df = 18.000

Cell No.	modalité	Phosphoreµg/gde sol Mean	1	2	3
5	Margine	3.05598	****		
7	Nanobiochare+Marc	3.06453	****		
6	Biochare+Marc	3.49188	****		
9	Nanobiochare+Margine	4.34658	****	****	
8	Biochare+Margine	4.38077	****	****	
4	Marc	7.20128	****	****	
2	Biochare	8.09872		****	
3	Nanobiochare	15.32094			****
1	Témoin	17.10726			****

Annexe 12 : Classement des traitements en groupe selon Tukey HSD pour le nitrate.

Cell No.	modalité	NO3-(Mg/g de sol Mean	1	2	3	4	5
	Tukey HSD test; variable NO3-(Mg/g de sol (Classeur kenza corrigé 1) Homogenous Groups, alpha = .05000 Error: Between MS = .15619, df = 18.000						
7	Nanobiochare+Marc	0.310341	****				
6	Biochare+Marc	0.409554	****	****			
4	Marc	0.923990	****	****	****		
8	Biochare+Margine	1.378058	****	****	****		
2	Biochare	1.483570		****	****		
5	Margine	1.848399			****	****	
1	Témoin	2.791706				****	****
9	Nanobiochare+Margine	2.869396				****	****
3	Nanobiochare	3.090919					****