Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture
http://www.rafea-congo.com
2026 ; Numéro Spécial - Octobre ; 187-199
ISSN (Print) : 2708-7743 **eISSN** : 2708-5422 **Dépôt légal** : JL 3.01807-57259

Fertilisation raisonnée et durable des sols ferrallitiques par l'association biochar-compost issus de plantes envahissantes : effets sur les performances phytotechniques de la ciboulette (*Allium schoenoprasum* L.) dans la Réserve de Biosphère de Yangambi, RDC

Jean Marc Kombele Atekami, Liston Ofeka kelekele, Sylvain Solia Edondoto, Ferdinand Kombele Bishosha Menea

Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi (IFA-Yangambi). Département des Sciences du sol et d'évaluation des terres. BP 1232 Kisangani (RDC). E-mail : jeanmarckombele@gmail.com

Reçu le 16 août 2026, **accepté le** 14 octobre 2026, **publié en ligne le** 31 octobre 2026
DOI : https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v9i4.18

RESUME

Description du sujet. La dégradation des sols ferrallitiques et la faible disponibilité des intrants agricoles constituent des contraintes majeures à la production maraîchère durable dans les écosystèmes tropicaux humides d'Afrique centrale.
Objectif. Cette étude vise à évaluer l'effet du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes locales sur les performances phytotechniques de la ciboulette (*Allium schoenoprasum* L.) cultivée dans la Réserve de Biosphère de Yangambi.
Méthodes. L'expérimentation a été conduite selon un dispositif en blocs complets randomisés comprenant quatre traitements : témoin sans amendement, biochar + compost, compost seul et biochar seul. Les paramètres de croissance et de rendement ont été suivis à 20, 40, 60 et 80 jours après semis. Les données ont été soumises à une analyse de variance.
Résultats. Les amendements organiques ont significativement amélioré la croissance et la productivité de la ciboulette. Le traitement combinant biochar et compost a obtenu les meilleures performances, avec une hauteur des plants de 49,25 cm, un diamètre au collet des touffes de 11,59 mm et un rendement de 6,71 t/ha contre 2,82 t/ha pour le témoin. Les différences entre traitements étaient hautement significatives.
Conclusion. L'association biochar-compost constitue une approche agro-écologique efficace pour améliorer la fertilité des sols ferrallitiques et accroître durablement la production maraîchère à Yangambi.

Mots-clés : *Allium schoenoprasum***,** biochar, fertilité des sols, rendement, Yangambi/RDC.

ABSTRACT

Rational and Sustainable Fertilization of Ferralsols Using a Biochar-Compost Blend Derived from Invasive Plants: Effects on the Agronomic Performance of Chives (*Allium schoenoprasum* L.) in the Yangambi Biosphere Reserve/DRC
Description of the subject. The degradation of ferrallitic soils and the limited availability of agricultural inputs represent major constraints to sustainable vegetable production in humid tropical ecosystems of Central Africa.
Objective. This study aimed to assess the effects of bamboo biochar and compost derived from local invasive plants on the phytotechnical performance of chives (*Allium schoenoprasum* L.) cultivated in the Yangambi Biosphere Reserve.
Methods. The experiment was conducted using a randomized complete block design consisting of four treatments: untreated control, biochar + compost, compost alone, and biochar alone. Growth and yield parameters were monitored at 20, 40, 60, and 80 days after sowing. The collected data were subjected to analysis of variance.
Results. Organic amendments significantly improved chive growth and productivity. The combined application of biochar and compost resulted in the highest performances, with plant height reaching 49.25 cm, collar diameter of clumps reaching 11.59 mm, and yield reaching 6.71 t ha^{-1} compared with 2.82 t ha^{-1} in the control treatment.

Conclusion. Differences among treatments were highly significant. The biochar–compost combination represents an effective agroecological approach for improving ferrallitic soil fertility and sustainably enhancing vegetable production under the environmental conditions of Yangambi.

Keywords: *Allium schoenoprasum*, biochar, soil fertility, crop yield, Yangambi/DRC.

1. INTRODUCTION

La fertilité des sols représente un facteur essentiel pour assurer la productivité agricole et la durabilité des systèmes de culture, particulièrement dans les régions tropicales humides où les processus d'altération chimique intense entraînent une perte progressive des éléments nutritifs essentiels aux plantes. Les sols ferrallitiques, largement répandus dans les régions tropicales d'Afrique, sont généralement caractérisés par une forte acidité, une faible teneur en carbone organique, une capacité limitée de rétention des nutriments et une faible disponibilité du phosphore assimilable, ce qui réduit considérablement leur potentiel de production agricole (Sanchez, 2019). Dans les écosystèmes tropicaux humides, la faible fertilité naturelle des sols constitue ainsi l'une des principales contraintes à l'intensification agricole durable (Vanlauwe *et al.,* 2010).

En Afrique subsaharienne, et particulièrement en Afrique centrale, la dégradation progressive des terres agricoles résulte de la combinaison de plusieurs facteurs, notamment l'exploitation continue des sols, la réduction des périodes de jachère, l'érosion des nutriments et la faible utilisation des amendements organiques. Ces processus affectent directement la productivité des cultures et compromettent la sécurité alimentaire des populations rurales dépendantes de l'agriculture familiale (Lal, 2015). Dans la région de Yangambi, située dans la forêt tropicale humide du bassin du Congo, les sols ferrallitiques fortement altérés présentent naturellement une faible réserve minérale, nécessitant des stratégies de gestion durable de la fertilité pour maintenir la production agricole (Alongo *et al*., 2013).

Les cultures maraîchères occupent une place importante dans les systèmes alimentaires urbains et périurbains d'Afrique centrale grâce à leur contribution à la diversification alimentaire et à la génération de revenus pour les producteurs. Cependant, leur productivité demeure limitée par la faible disponibilité des éléments nutritifs dans les sols et par l'accès réduit des producteurs aux fertilisants minéraux, souvent coûteux et difficilement accessibles dans les zones rurales isolées (Vanlauwe *et al.*, 2015). Dans ce contexte, le développement de pratiques agro-écologiques basées sur l'utilisation des ressources locales apparaît comme une alternative pertinente pour restaurer la fertilité des sols tout en réduisant la dépendance aux intrants externes.

Parmi les solutions agro-écologiques étudiées, l'utilisation des amendements organiques tels que le compost et le biochar suscite un intérêt croissant dans les systèmes agricoles tropicaux. Le compost constitue une source importante de matière organique et d'éléments nutritifs, permettant d'améliorer la structure du sol, l'activité biologique et la disponibilité progressive des nutriments pour les plantes (Bernal *et al*., 2009). Toutefois, sa minéralisation relativement rapide limite parfois la persistance de ses effets fertilisants dans les sols tropicaux fortement soumis au lessivage.

Le biochar, produit par pyrolyse de biomasses végétales en conditions limitées d'oxygène, représente une autre approche prometteuse pour améliorer durablement la qualité des sols. Grâce à sa structure poreuse, sa grande surface spécifique et sa stabilité du carbone, il peut augmenter la capacité d'échange cationique, améliorer la rétention de l'eau et favoriser la disponibilité des nutriments dans les sols pauvres (Lehmann et Joseph, 2015). Plusieurs études ont démontré que l'application du biochar dans les sols tropicaux peut stimuler la croissance des plantes et améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments, particulièrement lorsqu'il est associé à des sources organiques riches en éléments minéraux (Glaser et *al*., 2002 ; Jeffrey et *al*., 2017).

L'association du biochar avec le compost pourrait générer une synergie permettant de combiner les avantages de deux amendements : l'apport rapide en nutriments fourni par le compost et la capacité du biochar à stabiliser la matière organique et améliorer les propriétés physico-chimiques du sol. Des travaux récents indiquent que les amendements combinés biochar-compost peuvent favoriser davantage la croissance végétale, augmenter le stockage du carbone organique du sol et améliorer la disponibilité des nutriments comparativement à leur application individuelle (Liu *et al*., 2012 ; Agegnehu *et al*., 2017).

Malgré ces avancées scientifiques, les connaissances restent encore limitées concernant l'efficacité du biochar de bambou associé au compost élaboré à partir de plantes envahissantes locales dans les conditions pédoclimatiques spécifiques des sols ferrallitiques de la Réserve de Biosphère de Yangambi. La majorité des études sur les amendements organiques ont été réalisées dans d'autres contextes tropicaux, laissant un manque

d'informations sur leur potentiel pour les cultures maraîchères locales, notamment la ciboulette (*Allium schoenoprasum* L.), une culture à cycle court pouvant contribuer à la diversification des productions agricoles dans la région.

L'application combinée du biochar de bambou et du compost organique améliore davantage les performances phytotechniques de la ciboulette que l'absence d'amendement ou l'application individuelle de ces produits. L'étude vise à évaluer l'effet du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes locales sur la croissance et le rendement de la ciboulette cultivée sur les sols ferrallitiques de Yangambi. Spécifiquement, cette étude cherche à déterminer l'influence des différents traitements organiques sur les paramètres de croissance et de production de la culture et à identifier la combinaison d'amendements la plus efficace pour une production maraîchère durable dans les conditions tropicales humides d'Afrique centrale.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Site d'étude

L'étude a été conduite à Yangambi-centre, dans la province de la Tshopo, au nord-est de la République Démocratique du Congo. Le site expérimental est situé dans la Cité scientifique de Yangambi, à environ 100 km à l'ouest de la ville de Kisangani, sur la rive droite du fleuve Congo. Les coordonnées géographiques du site sont de 0°49′ N de latitude et 24°29′ E de longitude, avec une altitude moyenne de 470 m (Kombele, 2004). Le climat de Yangambi est de type équatorial humide, caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 1 837 mm, répartie sur près de 180 jours de pluie par an, et une température moyenne annuelle de 24,9 °C. L'humidité relative reste élevée pendant toute l'année, favorisant ainsi le développement d'une végétation dense et une forte activité biologique des sols (Kombele, 2004).

Les sols de la région appartiennent principalement à la classe des sols ferrallitiques fortement désaturés, caractérisés par une acidité élevée, une faible teneur en matière organique et une faible disponibilité des éléments nutritifs essentiels aux plantes. Ces contraintes pédologiques constituent une limitation importante pour les systèmes de production agricole et justifient l'évaluation d'amendements organiques capables d'améliorer durablement leur fertilité.

2.2. Matériel végétal et préparation des amendements organiques

Production du compost organique

Le compost utilisé dans cette expérimentation a été produit à partir de biomasses végétales locales issues principalement de plantes envahissantes disponibles dans l'environnement de Yangambi. Les matériaux végétaux utilisés comprenaient notamment *Pueraria javanica* (Benth.), *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray, *Panicum maximum* Jacq. [syn. *Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs] et *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. Ces biomasses végétales ont été associées à différents activateurs organiques et minéraux comprenant la bouse de bovins, les déjections porcines, les fientes de poules, les balles de riz, les cendres de bois ainsi qu'une faible quantité d'urée utilisée comme source d'azote pour stimuler l'activité microbienne durant la décomposition.

Le compostage a été réalisé en conditions aérobies sous forme de tas. Les différents matériaux ont été disposés en couches successives puis humidifiés afin de maintenir des conditions favorables à l'activité des microorganismes décomposeurs. Le tas de compost a ensuite été couvert avec une bâche plastique noire afin de limiter les pertes d'humidité et de maintenir une température favorable au processus de compostage.

Des retournements réguliers ont été effectués tous les dix jours afin d'assurer une bonne aération et une décomposition homogène des matériaux. Au total, cinq retournements ont été réalisés jusqu'à l'obtention d'un compost mature présentant une coloration brun foncé, une structure homogène et une texture stable.

Production du biochar de bambou

Le biochar utilisé dans cette étude a été produit à partir de bambous secs disponibles localement à Yangambi. La transformation de la biomasse a été réalisée par pyrolyse artisanale dans des fûts métalliques fermés fonctionnant avec une faible disponibilité en oxygène.

La carbonisation a été conduite pendant environ 1h30 par cycle, avec une température estimée comprise entre 450 et 550 °C. Cette pyrolyse lente a permis la conversion de la biomasse lignocellulosique en un matériau carboné stable. Au total, une quantité de 180 kg de biochar a été produite avec un rendement moyen de 6 kg par cycle de carbonisation. Après production, le biochar obtenu a été refroidi, broyé manuellement puis utilisé comme amendement organique dans les parcelles expérimentales.

Dispositif expérimental et application des traitements

L'expérimentation a été conduite selon un dispositif en blocs complets randomisés (Randomized Complete Block Design, RCBD) comprenant trois répétitions et quatre traitements correspondant aux différentes modalités d'amendement : T_0 = témoin sans amendement, T_1 = association biochar +

compost, T_2 = compost seul et T_3 = biochar seul. Chaque bloc comprenait les quatre traitements répartis aléatoirement afin de réduire l'effet de l'hétérogénéité spatiale du terrain.

Chaque unité expérimentale correspondait à une plate-bande de 6 m × 1,20 m, soit une superficie totale de 7,2 m². Les amendements ont été incorporés manuellement au sol avant le semis. La dose appliquée pour le compost seul était de 36 kg par plate-bande, tandis que le biochar seul a été appliqué à raison de 5 kg par plate-bande. Pour le traitement combiné (T_1), les doses appliquées correspondaient à 21,6 kg de compost et 3,6 kg de biochar par plate-bande, incorporés simultanément avant l'installation de la culture.

Installation de la culture et suivi phytotechniques

La culture étudiée était la ciboulette (*Allium schoenoprasum* L.). Après préparation du sol et incorporation des amendements, le semis a été réalisé directement sur les différentes unités expérimentales. Les observations phytotechniques ont été effectuées à 20, 40, 60 et 80 jours après semis (JAS). Les paramètres mesurés ont porté sur les indicateurs de germination, de croissance végétative et de productivité. Les variables étudiées étaient : nombre de plantules plantées, nombre de plantules levées, taux de plantules reprises (%), hauteur moyenne des plants (cm), diamètre au collet des touffes (mm), nombre moyen de feuilles par plant, nombre de touffes par unité expérimentale et rendement final exprimé en tonnes par hectare (t ha^{-1}). La hauteur des plants a été mesurée à l'aide d'une règle graduée, tandis que le diamètre au collet a été déterminé avec un pied à coulisse. Le rendement a été calculé à partir de la biomasse récoltée sur chaque unité expérimentale puis converti en tonnes par hectare.

Analyse statistique des données

Les données collectées ont été analysées statistiquement afin d'évaluer l'effet des traitements organiques sur les paramètres phytotechniques de la ciboulette. Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour tester l'effet des amendements et du temps d'observation sur les variables étudiées. Lorsque les différences entre traitements étaient significatives, les moyennes ont été comparées au seuil de probabilité de 5 % ($p < 0,05$).

Les analyses descriptives comprenaient le calcul des moyennes, écarts-types, valeurs minimales et maximales pour chaque paramètre mesuré. Les analyses statistiques ont permis d'identifier le traitement présentant les meilleures performances agronomiques dans les conditions écologiques de Yangambi.

3. RESULTATS

3.1. Effet des traitements sur la hauteur moyenne des plants

La hauteur des plants a augmenté progressivement entre 20 et 80 jours après semis pour l'ensemble des traitements, leurs valeurs moyennes sont illustrées par les courbes de la figure 5 ci-après dans la Réserve de Biosphère de Yangambi.

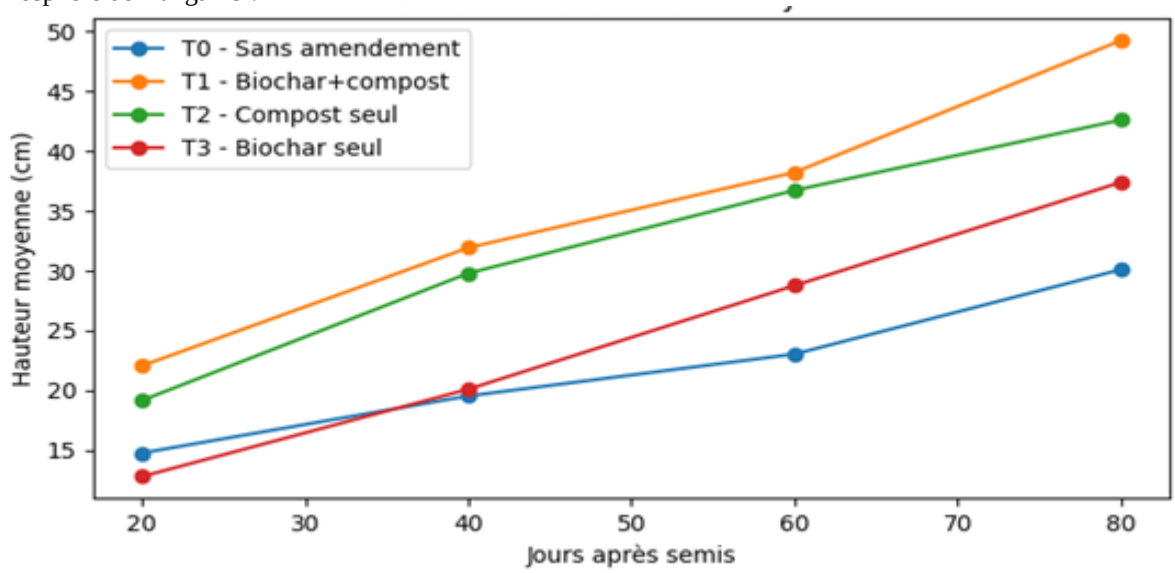

Figure 5. Évolution de la hauteur moyenne des plants (cm) suivant les traitements.

Les résultats montrent une supériorité constante du traitement T_1 (biochar + compost) durant toute la période des observations. À 20 jours après le semis, la hauteur moyenne atteignait 22,07 cm sous T_1 contre seulement 14,77

cm pour le témoin. À 40 jours après le semis, cette différence s'est accentuée avec respectivement 31,93 cm et 19,53 cm. À 60 jours après le semis, les plants soumis au traitement T_1 ont atteint une hauteur moyenne de 38,23 cm alors que le témoin n'atteignait que 23,03 cm. À 80 jours après le semis, le traitement T_1 a enregistré la valeur maximale de 49,25 cm contre 30,10 cm sous T0, représentant un gain de 63,63 %. Cette supériorité du traitement T_1 traduit un effet synergique entre le biochar et le compost qui fournit directement les éléments nutritifs nécessaires à la croissance de la ciboulette, tandis que le biochar améliore leur rétention dans le sol et réduit les pertes par lessivage. Le traitement T_2 a également présenté des performances élevées avec une hauteur finale de 42,61 cm tandis que le traitement T_3 a atteint 37,40 cm.

Ces résultats montrent que l'association biochar-compost améliore significativement la croissance végétative de la ciboulette dans les conditions écologiques de Yangambi. L'analyse statistique révèle des différences hautement significatives entre traitements à toutes les périodes des observations avec des valeurs de p comprises entre 0,000002 et 0,000009. Ces résultats indiquent que les amendements organiques exercent une influence positive déterminante sur la croissance en hauteur des plants de ciboulette.

Effet des traitements sur le diamètre moyen au collet des touffes

Le diamètre au collet des touffes a également augmenté progressivement au cours du cycle cultural ; ses valeurs moyennes sont illustrées par les courbes de la figure 6 ci-après.

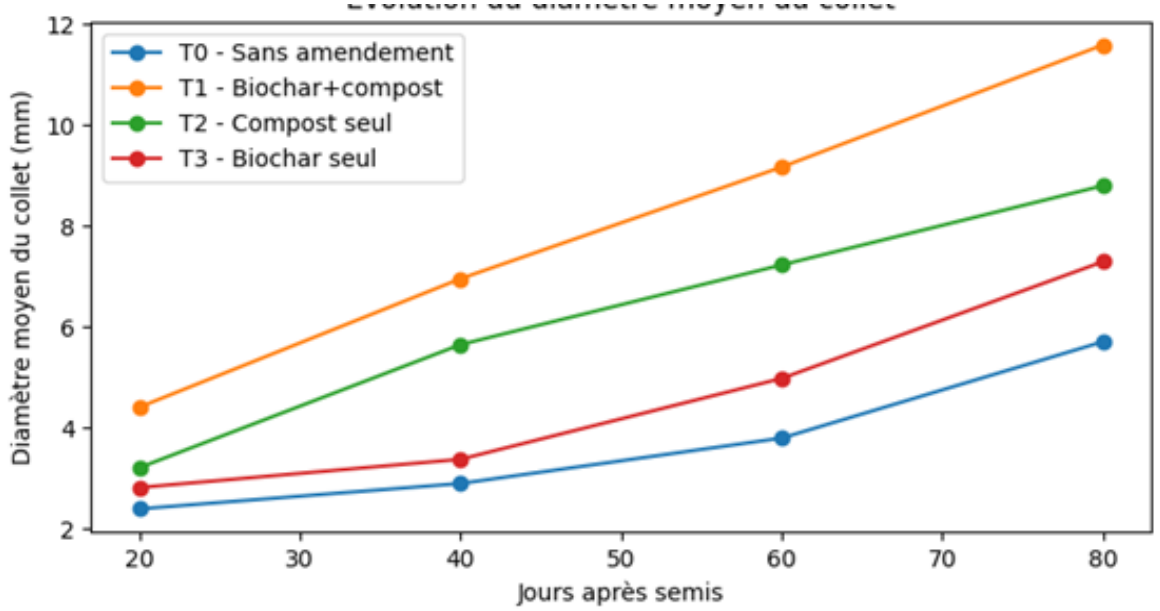

Figure 6. Évolution du diamètre moyen au collet des touffes (mm) de la ciboulette suivant les traitements

Sur la figure 6 ci-haut, les résultats obtenus montrent qu'à 20 jours après le semis, le diamètre moyen variait entre 2,40 mm sous T_0 et 4,41 mm sous T_1. À 40 jours après le semis, le traitement T_1 atteignait déjà 6,96 mm contre 2,90 mm pour le témoin. À 60 jours après le semis, les diamètres moyens observés étaient respectivement de 9,17 mm, 7,23 mm, 4,98 mm et 3,80 mm pour T_1, T_2, T_3 et T_0. À la fin du cycle, le diamètre maximal observé sous T_1 était de 11,59 mm contre seulement 5,71 mm sous le témoin. Cette augmentation représente un gain de 103,04 % par rapport au traitement sans amendement.

Les analyses statistiques indiquent des différences hautement significatives entre traitements pour toutes les périodes d'observation ($p < 0,001$). L'accroissement du diamètre au collet des touffes traduit une amélioration de la vigueur végétative et de l'accumulation de biomasse sous l'effet des amendements organiques. Les valeurs les plus élevées observées sous T_1 démontrent que la combinaison biochar-compost favorise efficacement le développement structural de la ciboulette, le légume-test.

Effet des traitements sur le nombre de plantules levées

Le nombre de plantules levées constitue un indicateur important de l'établissement initial de la culture. Les résultats obtenus montrent que les traitements organiques ont exercé une influence positive significative sur cette variable. La figure 7 ci-après illustre leurs valeurs moyennes par les histogrammes.

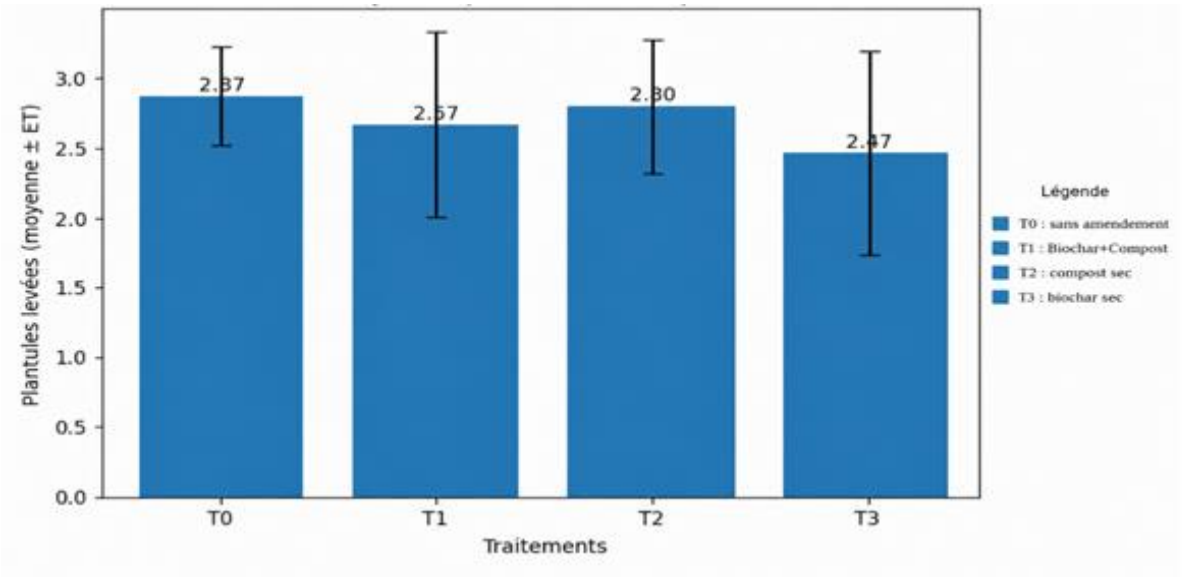

Figure 7. Variations du nombre moyen de plantules levées de la ciboulette selon les traitements

Les moyennes observées indiquent respectivement 2,87 ; 2,67 ; 2,80 et 2,47 plantules levées pour les traitements T_0, T_1, T_2 et T_3. L'analyse de variance a révélé un effet positif hautement significatif des traitements sur le nombre de plantules levées ($F = 11,50$; $p < 0,001$). Les différences observées sont liées aux modifications des propriétés physiques induites par les amendements organiques au sol.

Effet des traitements sur le taux de germination (%)

Le taux de germination représente l'un des premiers indicateurs de la réponse des cultures aux conditions édaphiques. Les pourcentages moyens de cette variable sont illustrés dans la figure 8 ci-après dans la réserve de biosphère de Yangambi, RDC.

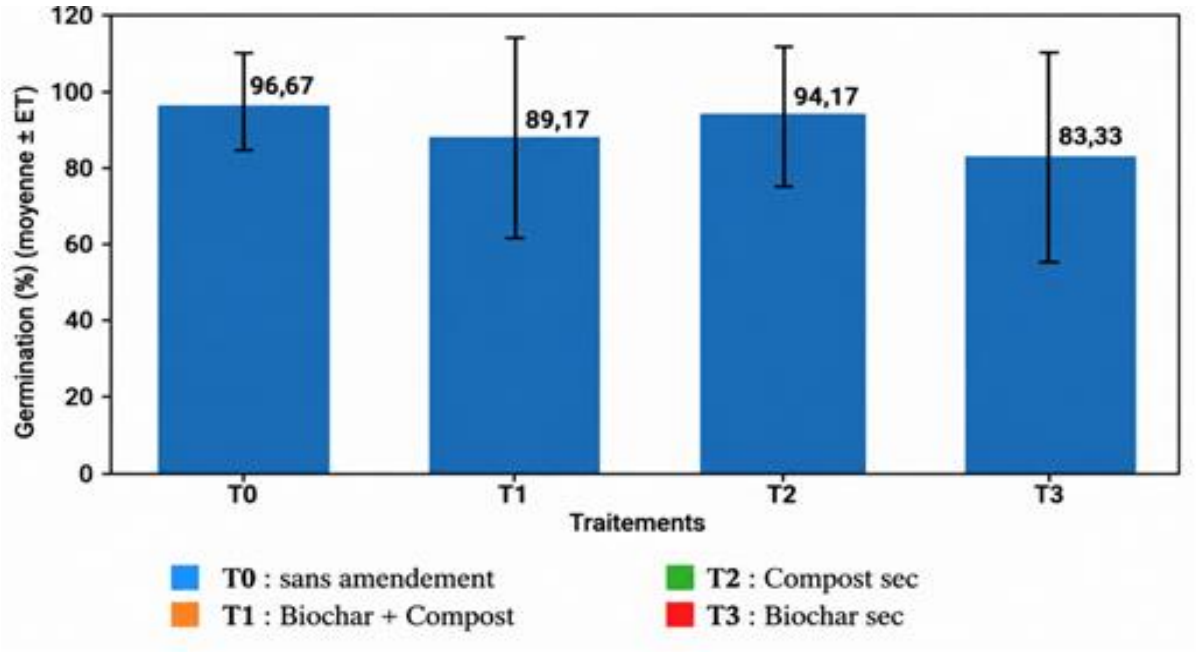

Figure 8. Taux moyen de germination de la ciboulette sous les différents traitements dans la réserve de biosphère de Yangambi, RDC.

Les résultats montrent des taux de germination relativement élevés pour l'ensemble des traitements. Les valeurs moyennes observées étaient de : T_0 = 96,67 %, T_1 = 89,17 %, T_2 = 94,17 % et T_3 = 83,33 %. L'analyse de variance révèle un effet significatif des traitements ($F = 11,12$; $p < 0,001$). Bien que les différences observées soient statistiquement significatives, les taux de germination demeurent globalement élevés pour tous les traitements, montrant une bonne qualité physiologique des semences utilisées.

Effet des traitements sur le nombre de feuilles

Le nombre de feuilles constitue un excellent indicateur du potentiel photosynthétique de cette culture-test. Les valeurs moyennes du nombre de feuilles observées dans la Réserve de Biosphère de Yangambi en RD Congo sont illustrées par les courbes de la figure 8 ci-après.

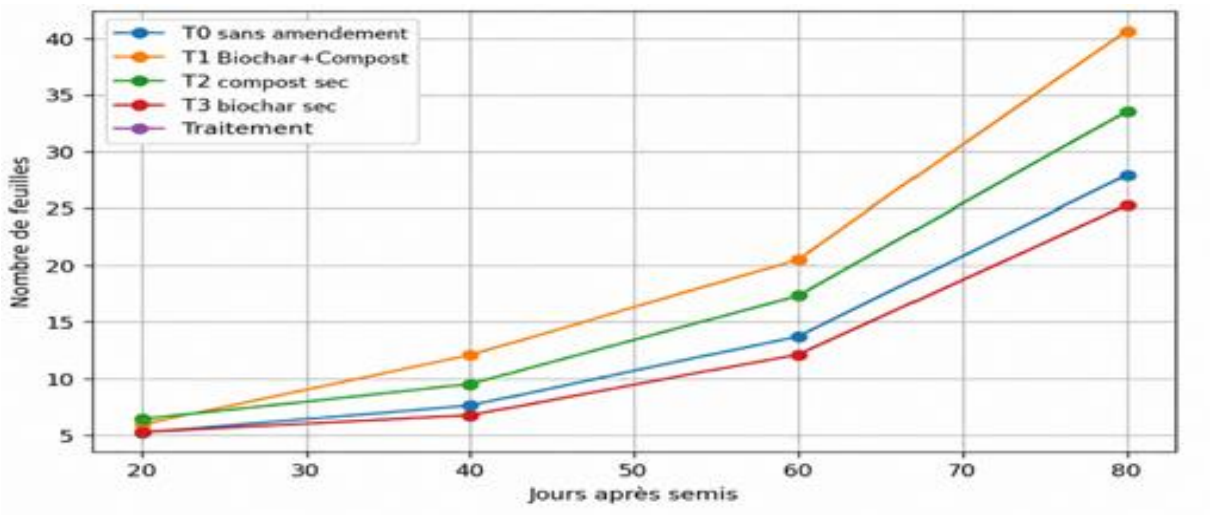

Figure 8. Evolution du nombre moyen de feuilles de la ciboulette suivant les traitements.

Sur la figure 9 ci-haut, les résultats montrent une augmentation continue du nombre de feuilles entre 20 et 80 JAS. À 80 JAS, les moyennes du nombre de feuilles observées étaient de : T_1 = 40,67 feuilles, T_2 = 33,53 feuilles, T_0 = 27,90 feuilles, et T_3 = 25,27 feuilles. Le traitement T_1 a ainsi permis une augmentation de 45,77 % du nombre de feuilles par rapport au témoin.

L'analyse de la variance indique un effet très hautement significatif des traitements ($F = 138,04$; $p < 0,001$) ainsi qu'un effet hautement significatif du temps d'observation ($F = 1682,32$; $p < 0,001$). Ces résultats affichent une amélioration importante de l'activité photosynthétique sous l'effet des amendements organiques.

Effet des traitements sur le nombre moyen de touffes

Le nombre moyen de touffes constitue un indicateur particulièrement important chez la ciboulette puisque cette variable est directement liée au potentiel de production. Les variations de l'évolution des valeurs moyennes sur les nombre de touffes sont illustrées par les courbes de la figure 9 ci-après.

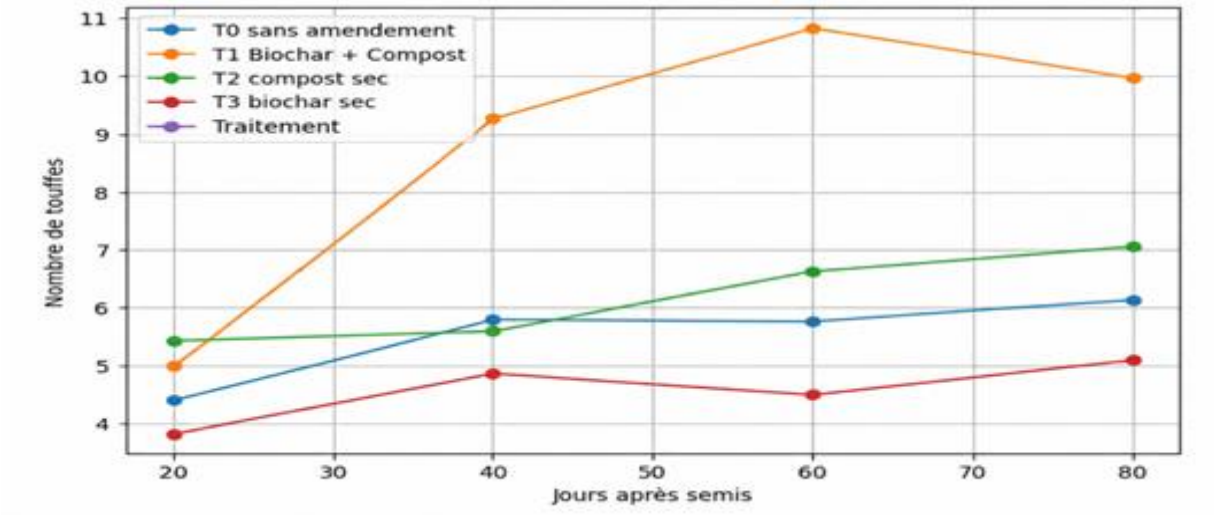

Figure 9. Évolution du nombre moyen de touffes de la ciboulette suivant les traitements.

Les résultats montrent des différences marquées entre traitements. À 80 JAS, les valeurs moyennes observées étaient de : T_1 = 9,97 touffes, T_2 = 7,07 touffes, T_0 = 6,13 touffes et T_3 = 5,10 touffes. L'analyse statistique indique un effet hautement significatif des traitements ($F = 129,21$; $p < 0,001$). Le traitement T_1 a permis une

augmentation de 62,64 % du nombre de touffes comparativement au témoin. Cette amélioration est attribuée à une meilleure nutrition minérale et à une disponibilité accrue de l'eau dans la rhizosphère.

Effet des traitements sur la longueur moyenne des feuilles (cm)

La longueur moyenne des feuilles montre une réponse positive nette chez les plants de ciboulette aux différents traitements appliqués. Les valeurs moyennes observées indiquent que l'apport d'amendements a significativement amélioré le développement foliaire par rapport au témoin sans amendement (T_0). Les variations des valeurs moyennes de la longueur des feuilles observées sont illustrées par les histogrammes la figure 10 ci-après.

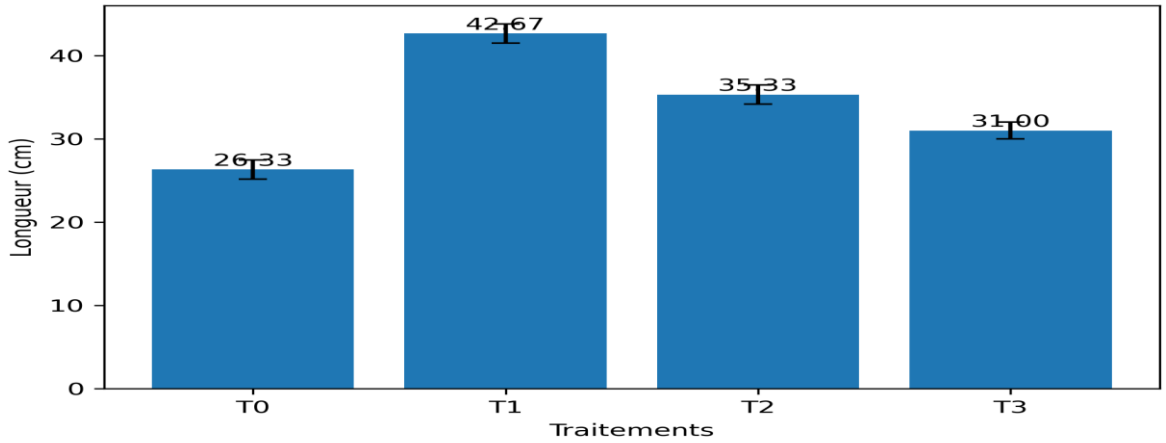

Figure 10. Variations de la longueur moyenne des feuilles (cm) de la ciboulette suivant les traitements

La longueur moyenne des feuilles varie de 26,33 ± 1,15 cm pour le témoin (T_0) à 42,67 ± 1,15 cm pour le traitement T_1 (biochar + compost). Cette augmentation représente 62,1%. Ainsi, T_1 a ajouté une augmentation de 62,1 % de la longueur foliaire par rapport au témoin. Les traitements T_2 (35,33 ± 1,15 cm) et T_3 (31,00 ± 1,00 cm) ont également amélioré la longueur des feuilles respectivement de 34,2 % pour T_2 et 17,7 % pour T_3. L'ordre de performance est $T_1 > T_2 > T_3 > T0$. Cette supériorité de T_1 montre une meilleure disponibilité des nutriments et une amélioration des propriétés physicochimiques du sol grâce à l'action combinée du biochar et du compost.

Effet des traitements sur la largeur moyenne des feuilles (cm)

Les différentes variations des valeurs moyennes en ce qui concerne la largeur des feuilles sur les effets des traitements de la ciboulette observée dans la Réserve de Biosphère de Yangambi sont illustrées par les histogrammes de la figure 11 ci-après.

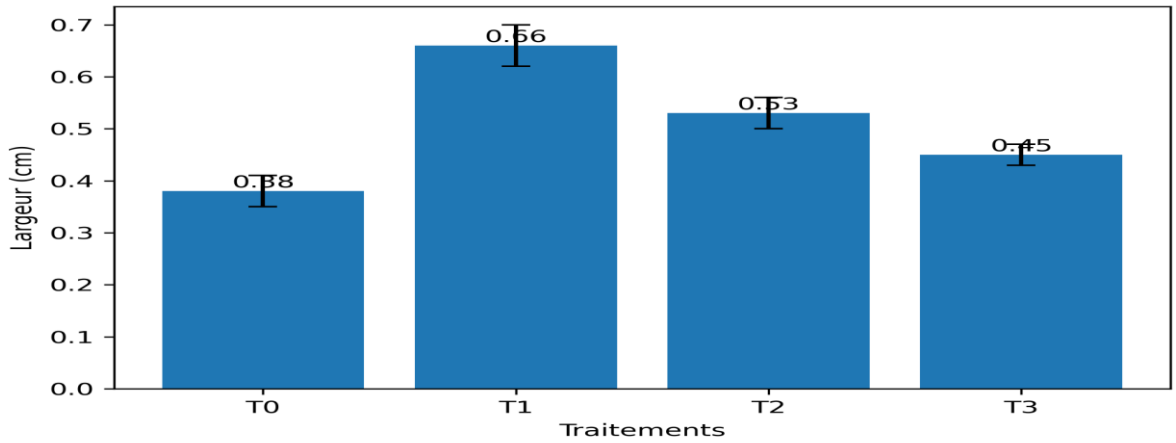

Figure 11. Variations de la largeur moyenne (cm) des feuilles de ciboulette suivant les traitements

La largeur foliaire moyenne est passée de 0,38±0,03cm dans le témoin à 0,66±0,04cm sous T_1. L'augmentation obtenue est de 73,7%. Les augmentations observées pour les autres traitements sont 39,5 % pour T_2 (0,53 ± 0,03cm) et 18,4 % pour T_3 (0,45 ± 0,02cm). La plus forte largeur foliaire enregistrée sous T_1 prouve une meilleure expansion cellulaire des tissus foliaires, probablement favorisée par une alimentation hydrique et minérale plus efficace.

Effet des traitements sur la surface foliaire moyenne (cm^2)

La surface foliaire constitue l'indicateur le plus pertinent du potentiel photosynthétique de la plante. Les différentes variations observées des valeurs moyennes des effets des traitements de la ciboulette en surface foliaire dans la Réserve de Biosphère de Yangambi sont illustrées par les histogrammes de la figure 12 ci-après.

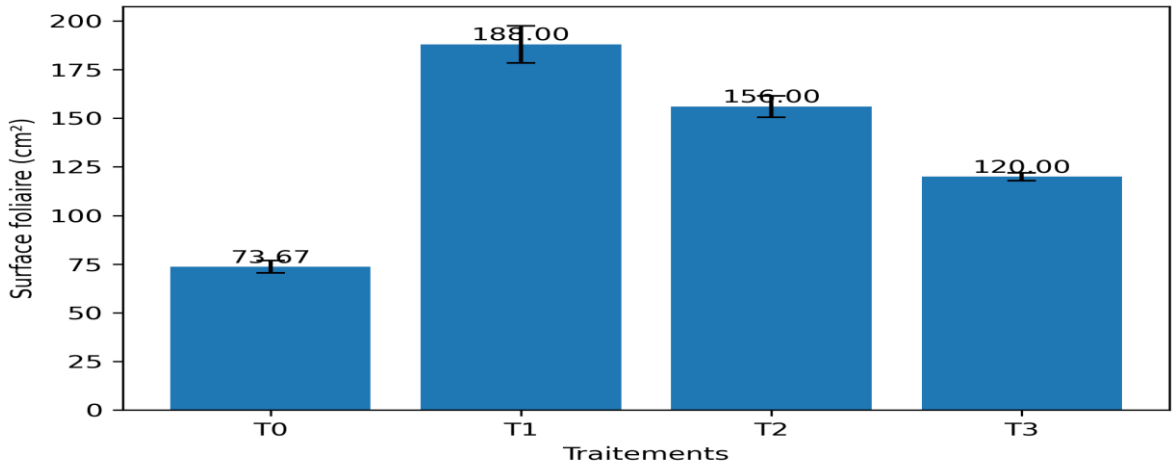

Figure 12. Variations des valeurs moyennes de la surface foliaire (cm^2) de la ciboulette sous les traitements

La surface foliaire constitue l'indicateur le plus pertinent du potentiel photosynthétique de la plante. Les résultats montrent que T_0 = 73,67±3,21 cm², T_1 = 188,00±9,54 cm², T_2 = 156,00 ± 5,57 cm² et T_3 = 120,00 ± 2,00 cm. Comparativement au témoin, les augmentations sont de 155,2 % pour T_1, 111,8 % pour T_2, et 62,9 % pour T_3. Le traitement T_1 a donc multiplié la surface foliaire par 2,55 que celle du témoin. Cette forte augmentation explique une amélioration substantielle de la capacité photosynthétique de la ciboulette, plant-test, ce qui s'est traduit par une accumulation plus importante de biomasse et potentiellement, par un meilleur rendement.

La supériorité du traitement biochar + compost (T_1) s'explique sans doute par l'effet synergique entre les deux amendements. Le biochar améliore la rétention de l'eau, la capacité d'échange cationique effective et la conservation des éléments nutritifs dans le sol, tandis que le compost constitue une source directe des nutriments facilement assimilables. Cette complémentarité favorise la croissance végétative et l'expansion foliaire. Le traitement T_2 présente des performances intermédiaires mais demeure nettement supérieur au témoin, démontrant l'intérêt de cet amendement pour stimuler la croissance des plantes. Le traitement T_3 améliore également les paramètres étudiés mais avec une efficacité moindre.

Effet des traitements sur le rendement (t/ha) de la ciboulette

Le rendement pour une production agricole est un indicateur essentiel qui mesure la quantité de la production obtenue. Les différentes variations des valeurs moyennes des effets des traitements sur le rendement de la ciboulette observées dans la Réserve de Biosphère de Yangambi sont illustrées par les histogrammes de la figure 13 ci-après.

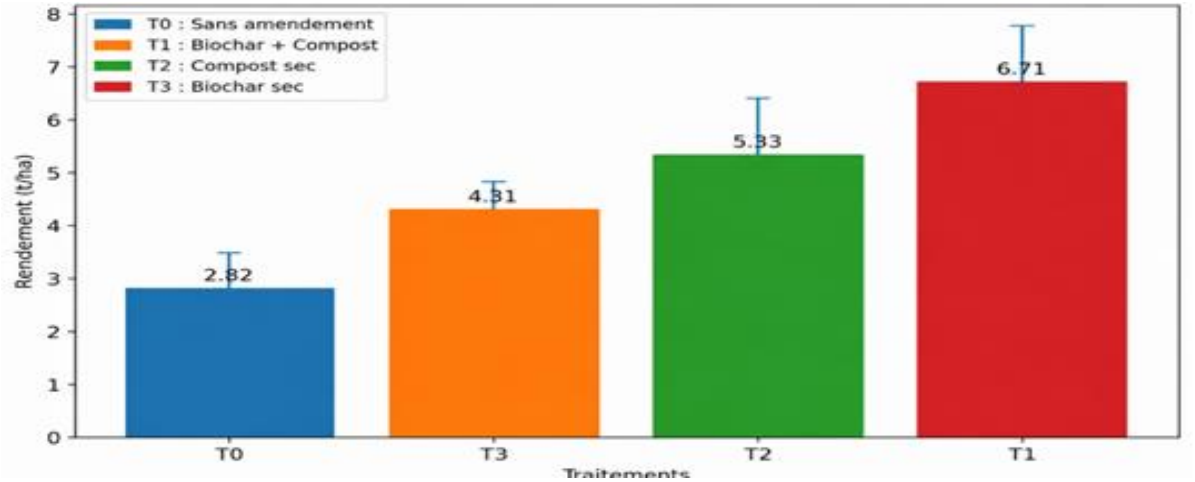

Figure 13. Variations des rendements moyens observés de la ciboulette sous les traitements

Les résultats sur la figure affichée ci-haut ont montré une variation importante des rendements moyens selon les traitements appliqués pour la culture de ciboulette. Les variations varient comme suite : T_0 (Témoin) = 2,82 t/ha, T_3 (Biochar sec) = 4,31 t/ha, T_2 (Compost sec) = 5,33 t/ha et T_1 (Biochar + Compost) = 6,71 t/ha. Le traitement T_1 (Biochar + Compost) a enregistré le rendement moyen le plus élevé (6,71 t/ha), soit plus du double du rendement observé sur le témoin (2,82 t/ha).

Cette augmentation affiche une synergie positive entre le biochar et le compost. L'amélioration du rendement sous l'effet du compost peut être attribuée à l'apport d'éléments nutritifs directement assimilables par les plantes, notamment l'azote, le phosphore et le potassium, tandis que le biochar améliore principalement les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. L'analyse de la variabilité des traitements révèle des coefficients de variation de 24,79 % pour le témoin (T_0)**,** 15,77 % pour T_1**,** 19,89 % pour T_2 et 11,59 % pour T_3. Ces résultats montrent que le traitement T_3 présente la plus faible variabilité, qui explique une réponse plus nette de la culture aux conditions expérimentales, tandis que le témoin T_0 affiche la plus forte variabilité, indiquant une plus grande dispersion des observations. Les traitements amendés, en particulier T_1 et T_3**,** ont ainsi contribué à réduire la disparité des réponses végétales, montrant un effet stabilisateur des amendements sur la croissance des plantes.

L'analyse de la variance réalisée sur les données de rendement de la ciboulette met en évidence un effet hautement significatif des traitements appliqués. En effet, le facteur traitement présente une valeur de F = 9,91 avec une probabilité associée de p = 0,0097, inférieure au seuil de signification de 5 % ($p < 0,05$). Cette différence statistiquement significative indique que les variations observées entre les traitements ne peuvent être attribuées au simple hasard expérimental, mais résultent directement de l'effet des amendements appliqués. Par conséquent, l'hypothèse nulle postulant l'égalité des moyennes entre les traitements est rejetée au profit de l'hypothèse alternative selon laquelle au moins un traitement diffère significativement des autres. Ces résultats démontrent que l'application du compost, du biochar ou de leur combinaison a exercé une influence significative sur le rendement de la ciboulette, confirmant ainsi l'efficacité agronomique de ces amendements dans l'amélioration des performances de la culture.

Par ailleurs, l'effet des blocs s'est révélé non significatif, avec une valeur de F = 0,65 et une probabilité de p = 0,553, largement supérieure au seuil de 5 %. Cette absence de différence significative entre les blocs indique que les variations liées à la dissimilarité spatiale du site expérimental étaient faibles et n'ont pas affecté de manière notable les résultats obtenus.

Ces résultats démontrent que l'association biochar + compost constitue l'amendement le plus performant pour la production de la ciboulette dans les conditions pédoclimatiques de Yangambi. Le rendement moyen le plus de 6,71 t/ha obtenu avec ce traitement traduit une amélioration synergique des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Cette technologie est une approche durable de gestion de la fertilité des sols tropicaux dégradés et peut être recommandée pour l'intensification écologique des systèmes maraîchers dans le bassin du Congo.

4. DISCUSSION

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent que l'application combinée du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes améliore significativement la croissance végétative et le rendement de la ciboulette dans les conditions pédoclimatiques de Yangambi-Centre. L'hypothèse selon laquelle l'association d'un amendement carboné stable (biochar) et d'un amendement organique riche en éléments nutritifs (compost) peut stimuler les performances phytotechniques de la culture est ainsi confirmée. La supériorité constante du traitement T1 (biochar + compost) par rapport aux amendements appliqués séparément traduit une complémentarité fonctionnelle entre les deux intrants plutôt qu'un simple effet additif.

Cette réponse positive s'explique par les interactions complexes entre les propriétés physico-chimiques du biochar, la dynamique de minéralisation du compost et les caractéristiques intrinsèques des sols ferrallitiques tropicaux de Yangambi. Ces sols fortement altérés (Ferralsols) présentent généralement une faible réserve en carbone organique, une faible capacité de rétention des nutriments et une forte acidité, limitant ainsi la biodisponibilité des éléments nutritifs essentiels à la croissance végétale (Brady et Weil, 2017). Dans ce contexte, l'apport simultané de matière organique facilement minéralisable et de carbone aromatique stable constitue une stratégie efficace pour restaurer la fertilité des sols à court et moyen termes.

La meilleure performance enregistrée sous le traitement T1, avec une hauteur moyenne des plants de 49,25 cm et un rendement de 6,71 t ha^{-1}, confirme que le biochar joue un rôle de régulateur des processus biogéochimiques du sol tandis que le compost agit comme une source immédiate de nutriments. Selon Lehmann et Joseph (2015), le biochar possède une structure poreuse et une grande surface spécifique qui favorisent l'adsorption des ions nutritifs, la protection de la matière organique et l'amélioration de l'habitat microbien du sol. Cette capacité de rétention limite le lessivage des

éléments mobiles, un phénomène particulièrement intense dans les environnements tropicaux humides caractérisés par de fortes précipitations comme ceux de Yangambi.

Par ailleurs, le compost produit à partir des plantes envahissantes représente une source importante d'azote, de phosphore et de potassium sous des formes progressivement assimilables par la culture. La minéralisation graduelle de la matière organique compostée fournit un flux continu de nutriments nécessaires aux processus physiologiques impliqués dans la croissance végétative, notamment la division cellulaire, la synthèse chlorophyllienne et l'accumulation de biomasse (Edwards *et al.,* 2000). Ainsi, l'association biochar-compost permet de s'affranchir du compromis classique entre la disponibilité rapide des nutriments et le maintien durable de la fertilité du sol.

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux rapportés par plusieurs études en milieu tropical. Steiner *et al.* (2007) ont montré que l'incorporation combinée du biochar et d'amendements organiques améliore davantage la productivité des cultures que l'application individuelle de ces produits dans les sols tropicaux carencés. De même, Agegnehu *et al.* (2016), travaillant sur des agrosystèmes tropicaux, ont démontré que la combinaison du biochar et du compost augmente significativement le stock de carbone organique, améliore les propriétés chimiques du sol et stimule la production végétale. Ces auteurs expliquent ces effets par une meilleure synchronisation entre la libération des nutriments issus du compost et leur rétention sur les surfaces chargées du biochar.

La hiérarchie observée dans cette étude : T1 (biochar + compost) > T2 (compost seul) > T3 (biochar seul) > T0 (témoin), fournit également des informations importantes sur les mécanismes d'action spécifiques de chaque amendement. Le compost seul a permis une amélioration importante du rendement (5,33 t ha^{-1}), ce qui confirme son rôle essentiel de source nutritive. Cependant, son efficacité demeure limitée dans les sols ferrallitiques fortement lessivés, où une fraction importante des éléments libérés peut rapidement migrer hors de la zone racinaire. Cette observation rejoint les conclusions de Vanlauwe *et al.* (2001), qui indiquent que dans les systèmes agricoles tropicaux, les amendements organiques seuls présentent une efficacité réduite lorsque les conditions du sol ne permettent pas une conservation optimale des nutriments.

À l'inverse, le biochar seul a amélioré les performances de la ciboulette comparativement au témoin, mais son effet reste inférieur à celui du compost. Cette réponse confirme que le biochar n'est généralement pas un fertilisant direct, mais plutôt un amendement améliorant l'environnement édaphique. Glaser *et al.* (2002) ont montré que les bénéfices agronomiques du biochar résultent principalement de son influence sur la capacité d'échange cationique (CEC), la rétention hydrique, la réduction de l'acidité et la stimulation des communautés microbiennes. Toutefois, lorsque le sol présente une faible disponibilité initiale en nutriments, comme dans les Ferralsols de Yangambi, l'application du biochar seul s'avère insuffisante pour satisfaire les besoins nutritionnels élevés d'une culture maraîchère intensive.

L'augmentation remarquable du rendement sous T1 (+138 % par rapport au témoin) constitue un indicateur fort de l'efficience agronomique de cette technologie. Cette amélioration peut être associée à une augmentation de l'efficience d'utilisation des nutriments (NUE), une meilleure économie de l'eau dans la rhizosphère et une stimulation de l'activité biologique du sol. Plusieurs travaux ont montré que le biochar peut favoriser la colonisation racinaire par des microorganismes bénéfiques, notamment les champignons mycorhiziens et les bactéries promotrices de la croissance végétale (PGPR), améliorant ainsi l'acquisition des nutriments par les plantes (Lehmann *et al*., 2011 ; Jeffery *et al.,* 2017).

Les résultats obtenus présentent également une importance particulière dans le contexte agroécologique de Yangambi. L'utilisation du bambou local comme matière première pour produire du biochar et la valorisation des plantes envahissantes pour fabriquer du compost représentent une approche d'économie circulaire. Elle permet simultanément de gérer les biomasses disponibles localement et d'améliorer durablement la fertilité des sols. Cette stratégie pourrait contribuer à réduire la dépendance aux engrais minéraux importés et à favoriser des systèmes maraîchers plus résilients dans les régions tropicales humides de la République Démocratique du Congo.

Cependant, certaines limites doivent être prises en compte dans l'interprétation de ces données. Premièrement, l'expérimentation a été réalisée sur une seule campagne culturale, alors que les effets du biochar sont généralement cumulatifs et s'accentuent après plusieurs cycles agricoles (Jeffery *et al*., 2011). Deuxièmement, l'étude n'a pas intégré l'évolution temporelle des propriétés chimiques et biologiques du sol après application des amendements. Des recherches futures devraient donc analyser la dynamique du carbone organique, l'évolution des communautés microbiennes, la cinétique de disponibilité des nutriments et l'efficience économique de cette technologie sur plusieurs saisons culturales.

Malgré ces limites, les résultats démontrent clairement que la combinaison biochar-compost constitue une option prometteuse pour optimiser la

productivité de la ciboulette dans les conditions pédoclimatiques de Yangambi. Cette approche représente une innovation agroécologique adaptée aux contraintes des sols ferrallitiques tropicaux et pourrait être transférée à d'autres cultures maraîchères et vivrières de la région.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer l'impact du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes sur les performances phytotechniques et le rendement de la ciboulette (Allium schoenoprasum L.) dans les conditions écologiques de Yangambi-Centre. Les résultats obtenus démontrent clairement que ces amendements organiques améliorent significativement la croissance, le développement végétatif et la productivité de la culture. À cet égard, le traitement T1 (biochar + compost) a systématiquement induit les meilleures performances pour l'ensemble des variables agro-morphologiques étudiées.

Le rendement maximal enregistré sous le traitement T1 a atteint 6,71 t ha^{-1} contre 2,82 t ha^{-1} pour le témoin (T0), ce qui correspond à une augmentation remarquable de 138 %. Les gains significatifs observés pour la hauteur des plants, le diamètre au collet, ainsi que le nombre de feuilles et de touffes par poquet, confirment l'efficience de cette association pour optimiser les conditions de développement de la culture.

Les analyses statistiques valident l'existence de différences hautement significatives entre les traitements, mettant en évidence l'effet de synergie des amendements. Sur les plans agronomique et édaphique, l'association biochar-compost améliore simultanément la fertilité chimique, la rétention hydrique, l'activité biologique et la biodisponibilité des nutriments. Ainsi, l'utilisation combinée du biochar de bambou et du compost de plantes envahissantes constitue une stratégie agroécologique performante pour restaurer durablement les Ferralsols de la région et accroître la productivité maraîchère. Cette technologie représente une alternative durable, reproductible et accessible pour les producteurs de la République Démocratique du Congo.

Afin d'approfondir ces résultats encourageants et de valider la viabilité à long terme de cette pratique, plusieurs axes de recherche méritent d'être explorés : (i) Étudier l'impact à long terme (sur plusieurs cycles de culture successifs sans réapplication) du biochar et du compost pour mesurer la persistance de leur effet sur la fertilité du Ferralsol, (ii) Tester différentes proportions et combinaisons de biochar et de compost afin d'identifier le ratio technico-économique optimal pour les maraîchers, (iii) Analyses microbiologiques et dynamiques du carbone : Caractériser l'évolution de l'activité biologique du sol (microflore, biomasse microbienne) et quantifier le potentiel de séquestration du carbone de cette association.

Remerciements

Les auteurs expriment leur sincère reconnaissance à l'Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi (IFA-Yangambi) et à l'Équipe de Gestion Opérationnelle du Projet GIFT (EGOP-GIFT) pour l'appui institutionnel et financier apporté à la valorisation et à la diffusion des résultats de cette recherche, notamment à travers la prise en charge des frais liés à la présente publication.

Cet appui à la publication s'inscrit dans le cadre des activités de valorisation des résultats de recherche des enseignants-chercheurs de l'IFA-Yangambi soutenues par le Projet d'appui à la Gouvernance, l'Insertion et la Formation Agricole et Rurale dans la Tshopo (GIFT – COD2100311), mis en œuvre avec l'appui d'Enabel et financé par l'Agence Française de Développement (AFD), conformément à la Convention de subside COD21003-10039.

Références

Agegnehu G., Bass A. M., Nelson P. N. & Bird M. I., 2016. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295–306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054

Agegnehu G., Srivastava A. K. & Bird M. I., 2017. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, 119, 156–170. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008

Alongo S., Visser M., Kombele F., Colinet G. & Bogaert J., 2013. Propriétés et diagnostic de l'état agropédologique du sol de la série Yakonde après fragmentation de la forêt à Yangambi, République Démocratique du Congo. *Annales des Sciences Agronomiques*, 5(1), 36–51.

Bernal M. P., Alburquerque J. A. & Moral R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027

Brady N. C. & Weil R. R., 2017. *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.

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

Jeffery S., Abalos D., Spokas K. A., Verheijen F. G. A. & Mommer L., 2017. Biochar effects on crop yield. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd ed., pp. 301–325.

Jeffery S., Verheijen F. G. A., van der Velde M. & Bastos A. C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.

Lal R., 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. https://doi.org/10.3390/su7055875

Lehmann J. & Joseph S., 2015. *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*, 2nd ed., 46 p.

Lehmann J., Rillig M. C., Thies J., Masiello C. A., Hockaday W. C. & Crowley D., 2011. Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836.

Liu E., Yan C., Mei X., He W., Bing S. H., Ding L., Liu Q., Liu S. & Fan T., 2012. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*, 177, 171–178.

Palm C. A., Gachengo C. N., Delve R. J., Cadisch G. & Giller K. E., 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1–2), 27–42.

Sanchez P. A., 2019. *Properties and management of soils in the tropics*. Cambridge University Press, 666 p.

Steiner C., Glaser B., Teixeira W. G., Lehmann J., Blum W. E. H. & Zech W., 2007. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(4), 479–485.

Vanlauwe B., Bationo A., Chianu J., Giller K. E., Merckx R., Mokwunye U., Ohiokpehai O., Pypers P., Tabo R., Shepherd K. D., Smaling E. M. A., Woomer P. L. & Sanginga N., 2010. Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture*, 39(1), 17–24.

Vanlauwe B., Diels J., Sanginga N. & Merckx R., 2001. *Integrated plant nutrient management in sub-Saharan Africa: From concept to practice*. CAB International, 352 p.