



Fertilisation raisonnée et durable des sols ferrallitiques de Yangambi par l'association biochar-compost issue des plantes envahissantes : effets sur les performances phytotechniques de chou pommé (*Brassica oleracea* var. *capitata*.) dans la Réserve de la Biosphère de Yangambi, République Démocratique du Congo

Liston Ofeka Kelekel^{1*}, Marc Kombele Atekami², Sylvain Solia Edondoto³, Jean Pierre Meniko To Hulu⁵, Edouard Ndjango Ndjimani⁶, Augustin Paluku Nziavaki⁷, Nathalie Ngalya Bengé⁸, Ferdinand Kombele Bishosha Menea⁴

⁽¹⁾Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi (IFA-Yangambi). Département des Sciences du sol et d'évaluation des terres. Laboratoire de gestion de fertilité des sols et développement durable. BP 1232 Kisangani (RDC). E-mail : listonofeka5@gmail.com

⁽²⁾Institut Facultaire des sciences Agronomiques de Yangambi. Option Eau et Forêt. Laboratoire d'Ecologie du paysage et Foresterie Tropicale. BP 1232 Kisangani (RDC)

⁽³⁾Institut Facultaire des sciences Agronomiques de Yangambi. Département de Chimie et Industrie Agricole. Laboratoire de Biochimie et Nutrition Humaine et Animale. BP 1232 Kisangani (RDC)

⁽⁴⁾Institut Facultaire des sciences Agronomiques de Yangambi. Département de phytotechnie. Laboratoire d'Ecophysiologie et Nutrition des plantes. BP 1232 Kisangani (RDC)

⁽⁵⁾Institut Facultaire des sciences Agronomiques de Yangambi. Département de zootechnie agricole. P 1232 Kisangani (RDC).

Reçu le 15 août 2026, accepté le 20 octobre 2026, publié en ligne le 31 octobre 2026

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v9i4.13>

RESUME

Description du sujet. La fertilité des sols constitue un facteur déterminant de la productivité agricole. Dans la Réserve de Biosphère de Yangambi, les sols ferrallitiques, souvent acides et pauvres en éléments nutritifs, limitent les performances des cultures maraîchères.

Objectif. Cette étude vise à évaluer l'effet du biochar de bambou et du compost produit à partir de plantes envahissantes locales sur la croissance et le rendement du chou pommé (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

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 phytotechniques de croissance et de rendement ont été mesurés au cours du cycle cultural. Les données obtenues ont été soumises à une analyse de variance afin d'évaluer l'effet des traitements.

Résultats. Les amendements organiques ont significativement amélioré les performances du chou pommé. Le traitement au biochar a enregistré les meilleures performances, avec une hauteur moyenne des plants de 13,9 cm, un poids frais moyen de 0,38 kg et un rendement de 15,33 t/ha, contre 9,48 t/ha pour le témoin. Les différences observées entre les traitements étaient hautement significatives.

Conclusion. Le biochar de bambou et le compost de plantes envahissantes constituent des amendements organiques prometteurs pour améliorer la fertilité des sols ferrallitiques et accroître durablement la productivité du chou pommé dans la Réserve de Biosphère de Yangambi.

Mots-clés : Biochar de bambou, compost, fertilité des sols, chou pommé, amendement organique et Yangambi/RDC.

ABSTRACT

Rational and sustainable fertilization of Yangambi ferralsols using a biochar-compost mixture derived from invasive plants: effects on the agronomic performance of head cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) in the Yangambi Biosphere Reserve, Democratic Republic of the Congo

Description of the subject. Soil fertility is a key factor determining agricultural productivity. In the Yangambi Biosphere Reserve, Ferralsols, which are often acidic and nutrient-poor, constrain the performance of vegetable crops.

Objective. This study aimed to assess the effects of bamboo biochar and compost produced from locally invasive plants on the growth and yield of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*).

Methods. The experiment was conducted using a randomized complete block design with four treatments: an unamended control, biochar + compost, compost alone, and biochar alone. Plant growth and yield-related parameters were monitored throughout the cropping cycle. The data were subjected to analysis of variance to assess the effects of the treatments. Organic amendments significantly improved cabbage growth and productivity.

Results. The biochar treatment showed the best performance, with a mean plant height of 13.9 cm, a mean fresh weight of 0.38 kg, and a yield of 15.33 t/ha, compared with 9.48 t/ha for the control. The differences among treatments were highly significant.

Conclusion. Bamboo biochar and compost derived from invasive plants represent promising organic amendments for improving the fertility of Ferralsols and sustainably increasing cabbage productivity in the Yangambi Biosphere Reserve.

Keywords: Bamboo biochar, compost, soil fertility, cabbage, organic amendment, Yangambi/DRC.

1. INTRODUCTION

La fertilité des sols constitue l'un des principaux déterminants de la productivité agricole et de la durabilité des systèmes de production. Elle peut être définie comme la capacité d'un sol à assurer durablement le développement des plantes grâce à un approvisionnement adéquat en éléments nutritifs et au maintien de propriétés physiques, chimiques et biologiques favorables. Dans les régions tropicales humides, cette fertilité est particulièrement menacée par l'intensification des activités agricoles, le lessivage des éléments nutritifs, la surexploitation des terres, les pratiques culturales inadéquates, les fortes précipitations et la minéralisation rapide de la matière organique sous l'action des microorganismes (Wang *et al.*, 2024 ; Bauters *et al.*, 2021 ; Islam *et al.*, 2000 ; Ewel *et al.*, 1991).

Lorsque les éléments nutritifs exportés par les cultures ne sont pas suffisamment restitués au sol, leur stock diminue progressivement, entraînant une dégradation de la fertilité et une baisse de la productivité agricole (Van Vliet et Giller, 2016). Dans les systèmes agricoles non fertilisés, cette dynamique peut notamment se traduire par un bilan négatif du potassium, élément essentiel à la croissance et à la production végétale (Hartemink *et al.*, 2005).

La restauration et le maintien de la fertilité des sols constituent ainsi un enjeu majeur pour les systèmes agricoles tropicaux. Parmi les stratégies agro-écologiques susceptibles de limiter la dégradation des sols, l'utilisation d'intrants organiques apparaît comme une alternative intéressante aux apports exclusivement minéraux. Ces intrants contribuent à la restitution de la matière organique et des éléments nutritifs, tout en favorisant l'activité biologique et certaines propriétés physiques du sol. Tamburini *et al.* (2020), à partir d'une synthèse de la littérature, ont notamment montré que l'utilisation d'intrants organiques peut améliorer la fertilité des sols, favoriser la séquestration du carbone et accroître la rétention de l'eau grâce à l'apport simultané de matière organique, de microorganismes et de nutriments. Dans ce contexte, la valorisation de biomasses végétales localement disponibles, notamment les plantes envahissantes, pourrait constituer une voie pertinente pour produire des

amendements organiques adaptés aux conditions locales tout en contribuant à la gestion de ces ressources végétales.

Parmi les amendements organiques étudiés, le compost présente un intérêt particulier en raison de sa capacité à restituer progressivement de la matière organique et des éléments nutritifs au sol. Son incorporation peut améliorer la structure du sol, stimuler l'activité biologique et accroître la disponibilité des nutriments nécessaires à la croissance des plantes (Bernal *et al.*, 2009). Cependant, dans les environnements tropicaux caractérisés par des températures élevées et une forte pluviométrie, la décomposition relativement rapide de la matière organique peut réduire la persistance de ses effets fertilisants et favoriser les pertes d'éléments nutritifs par lessivage. Cette limite justifie la recherche d'amendements complémentaires capables de prolonger et de stabiliser les effets du compost.

Le biochar, obtenu par pyrolyse de biomasses végétales dans des conditions limitées en oxygène, constitue une autre option agro-écologique prometteuse pour améliorer durablement la qualité des sols. Sa structure poreuse, sa forte surface spécifique et la stabilité relative de son carbone lui confèrent la capacité d'influencer favorablement plusieurs propriétés du sol, notamment la capacité d'échange cationique, la rétention de l'eau et la disponibilité des éléments nutritifs (Lehmann et Joseph, 2015). Plusieurs travaux ont montré que l'application du biochar peut améliorer les conditions de croissance des plantes dans les sols tropicaux pauvres et accroître l'efficacité d'utilisation des nutriments, notamment lorsqu'il est associé à des sources organiques riches en éléments nutritifs (Glaser *et al.*, 2002 ; Jeffrey *et al.*, 2017). Toutefois, l'efficacité du biochar dépend fortement de son origine, de ses caractéristiques physico-chimiques, des propriétés du sol et des modalités d'application. Son utilisation seule ne permet donc pas nécessairement de répondre à l'ensemble des besoins nutritifs des cultures.

L'association du biochar et du compost apparaît dès lors comme une stratégie susceptible de tirer parti des propriétés complémentaires de ces deux

amendements. Le compost constitue principalement une source de matière organique et d'éléments nutritifs relativement disponibles, tandis que le biochar peut contribuer à la rétention des nutriments, à l'amélioration de certaines propriétés physico-chimiques du sol et à la stabilisation d'une partie du carbone organique. Cette complémentarité pourrait ainsi créer des conditions plus favorables à la croissance et à la production des cultures que l'utilisation séparée de chacun des amendements. Des études ont effectivement montré que l'application combinée du biochar et du compost peut améliorer la croissance végétale, accroître le stockage du carbone organique du sol et favoriser la disponibilité des nutriments par rapport à l'utilisation individuelle de ces amendements (Ageghehu *et al.*, 2017 ; Liu *et al.*, 2012).

Malgré ces résultats encourageants, les effets de l'association d'un biochar produit à partir de bambou et d'un compost issu de plantes envahissantes locales restent peu documentés dans les conditions agro-écologiques de la République Démocratique du Congo, particulièrement dans la Réserve de Biosphère de Yangambi. Cette zone est caractérisée par des sols ferrallitiques soumis à une forte altération et à des conditions climatiques favorisant le lessivage des éléments nutritifs. Par ailleurs, les connaissances disponibles sur l'efficacité comparative du biochar de bambou, du compost de plantes envahissantes et de leur association pour la production du chou pommé demeurent limitées dans ce contexte. Ce manque d'informations constitue un frein à la formulation de stratégies de fertilisation organique adaptées aux conditions locales et à la promotion d'une production maraîchère durable.

La question centrale de cette étude est donc la suivante : l'association du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes locales permet-elle d'améliorer davantage les performances phytotechniques du chou pommé que l'application individuelle de ces amendements ou l'absence d'amendement sur les sols ferrallitiques de Yangambi ?

L'hypothèse formulée est que l'application combinée du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes locales améliore significativement la croissance et le rendement du chou pommé par rapport au témoin non amendé et aux applications individuelles du biochar ou du compost, grâce à la complémentarité de leurs effets sur la disponibilité des nutriments et les conditions de croissance des plantes.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'effet du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes locales sur les performances phytotechniques du chou pommé (*Brassica oleracea* var. *capitata*) cultivé sur les sols ferrallitiques de la Réserve de Biosphère de Yangambi. Plus spécifiquement, il s'agit de : (i) déterminer l'effet des

différents traitements organiques sur les paramètres de croissance du chou pommé ; (ii) évaluer leur influence sur les paramètres de production et le rendement de la culture ; et (iii) comparer l'efficacité du biochar, du compost et de leur association afin d'identifier le traitement le plus performant pour une production maraîchère durable dans les conditions tropicales humides de Yangambi.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Site d'étude

L'étude a été réalisée à Yangambi-Centre, dans la province de la Tshopo, au nord-est de la République démocratique du Congo (RDC). Le site expérimental est localisé au sein de la Cité scientifique de Yangambi, à environ 100 km à l'ouest de la ville de Kisangani, sur la rive droite du fleuve Congo. Il se situe à 0°49' de latitude Nord et 24°29' de longitude Est, à une altitude moyenne de 470 m (Kombele, 2004).

Yangambi est caractérisé par un climat équatorial chaud et humide, avec une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 1 837 mm, répartie sur près de 180 jours de pluie. La température moyenne annuelle est de 24,9 °C et l'humidité relative demeure élevée tout au long de l'année. Ces conditions climatiques favorisent le développement d'une végétation dense ainsi qu'une activité biologique importante au sein des sols (Kombele, 2004).

Sur le plan pédologique, les sols de Yangambi sont principalement constitués de sols ferrallitiques fortement désaturés. Ils se caractérisent notamment par une réaction acide, une faible teneur en matière organique et une disponibilité limitée de plusieurs éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes. Ces caractéristiques constituent des contraintes majeures pour la production agricole et soulignent la nécessité de développer des stratégies de fertilisation adaptées aux conditions locales. Dans ce contexte, l'utilisation d'amendements organiques tels que le biochar et le compost apparaît comme une approche potentiellement intéressante pour améliorer les propriétés du sol et soutenir durablement la production maraîchère.

2.2. Matériel végétal et préparation des amendements organiques

Production du compost organique

Le compost utilisé dans le cadre de l'expérimentation a été élaboré à partir de ressources végétales disponibles localement dans la région de Yangambi, notamment des espèces végétales considérées comme envahissantes. Les principales biomasses incorporées étaient *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 matières végétales ont été complétées par

plusieurs sources organiques et minérales destinées à favoriser le processus de décomposition, notamment la bouse bovine, les déjections porcines, les fientes de volaille, les balles de riz et les cendres de bois. Une faible proportion d'urée a également été incorporée afin d'apporter de l'azote et de soutenir l'activité des microorganismes responsables de la dégradation des matières organiques.

Le processus de compostage a été conduit en plein air selon une méthode aérobie, par constitution d'un tas à partir des différents matériaux. Ceux-ci ont été répartis successivement en couches, puis humidifiés de manière à maintenir un niveau d'humidité favorable au développement et à l'activité des microorganismes décomposeurs. Une bâche plastique noire a été utilisée pour recouvrir le tas, permettant notamment de réduire les pertes d'eau et de favoriser le maintien de conditions thermiques appropriées à la décomposition.

Afin d'assurer une oxygénation suffisante du tas et de favoriser une décomposition régulière de l'ensemble des matériaux, les opérations de retournement ont été réalisées à intervalles réguliers de dix jours. Cinq retournements ont ainsi été effectués au cours du processus de compostage. La maturation du compost a été appréciée sur la base de caractéristiques visuelles et physiques, notamment l'apparition d'une coloration brun foncé, une texture homogène et une structure relativement stable, indiquant l'atteinte d'un état de maturité approprié pour son utilisation comme amendement organique.

Production du biochar de bambou

Le biochar employé dans le cadre de l'expérimentation a été obtenu à partir de bambous secs collectés localement dans la région de Yangambi. La conversion de cette biomasse ligno-cellulosique en matériau carboné a été effectuée au moyen d'une technique de pyrolyse artisanale utilisant des fûts métalliques fermés, dans lesquels l'apport d'oxygène était volontairement limité.

Chaque cycle de carbonisation a duré approximativement 1 h 30, à une température estimée entre 450 et 550 °C. Ces conditions de pyrolyse ont favorisé la transformation progressive de la biomasse végétale en un produit carboné relativement stable. L'ensemble des opérations de production a permis d'obtenir environ 180 kg de biochar, avec une production moyenne estimée à 6 kg par cycle de carbonisation.

À l'issue de la carbonisation, le matériau a été laissé à refroidir avant d'être récupéré. Le biochar a ensuite été réduit manuellement en fragments de plus petite taille afin de faciliter son incorporation et son utilisation dans les parcelles expérimentales. Le produit ainsi obtenu a été directement employé comme amendement organique dans le dispositif expérimental.

Dispositif expérimental et application des traitements

L'essai a été mis en place suivant un dispositif en blocs complets randomisés (Randomized Complete Block Design, RCBD), avec trois répétitions et quatre modalités de traitement. Les traitements étaient constitués comme suit : T₀, parcelle témoin sans apport d'amendement ; T₁, combinaison du biochar et du compost ; T₂, apport de compost uniquement ; et T₃, application du biochar seul. Au sein de chaque bloc, les quatre traitements ont été distribués de manière aléatoire afin de limiter l'influence de la variabilité spatiale du site expérimental sur les résultats obtenus.

Chaque traitement occupait une plate-bande de 6 m de longueur sur 1,20 m de largeur, correspondant à une superficie de 7,2 m². Avant la mise en place de la culture, les amendements ont été épandus puis incorporés manuellement dans la couche superficielle du sol. Pour le traitement T₂, la quantité de compost apportée était de 36 kg par plate-bande, tandis que le traitement T₃ recevait 5 kg de biochar par plate-bande. Dans le cas du traitement combiné T₁, l'apport était constitué de 21,6 kg de compost associé à 3,6 kg de biochar par plate-bande. Les deux amendements ont été mélangés et incorporés simultanément au sol avant l'installation de la culture.

Installation de la culture et suivi phytotechniques

Le chou pommé (*Brassica oleracea* var. *capitata*) a été retenu comme culture test pour cette expérimentation. Après la préparation des unités expérimentales et l'incorporation des différents amendements, les graines ont été semées directement sur les plate-bandes correspondant aux différents traitements. Un suivi régulier des plants a ensuite été réalisé afin d'évaluer leur réponse aux modalités de fertilisation appliquées.

Les observations ont porté à la fois sur les caractéristiques de la croissance végétative et sur les composantes de la production. Les paramètres retenus comprenaient le nombre de feuilles, le diamètre au collet, la hauteur des plants, la longueur et la largeur des feuilles, ainsi que la surface foliaire. Les variables relatives à la production comprenaient également la circonférence et la hauteur des pommes, leur poids frais par unité expérimentale et le rendement obtenu, exprimé en tonnes par hectare (t ha⁻¹).

Les mesures de hauteur des plants ont été effectuées au moyen d'une règle graduée, tandis que le diamètre au collet a été déterminé à l'aide d'un pied à coulisse. À la récolte, la biomasse fraîche produite par chaque unité expérimentale a été pesée afin de déterminer la production de chaque traitement. Les valeurs obtenues ont ensuite été rapportées à une base d'un hectare pour calculer le rendement final en t ha⁻¹.

Analyse statistique des données

Les données obtenues au cours de l'expérimentation ont été organisées et analysées afin de déterminer l'influence des différents amendements organiques sur la croissance et la production du chou pommé. Une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour comparer les traitements et vérifier si les différences observées entre eux étaient statistiquement significatives. Lorsque l'ANOVA indiquait une

différence significative, les moyennes ont été comparées au seuil de 5 % ($p < 0,05$).

Pour chaque paramètre étudié, les statistiques descriptives ont également été calculées, notamment la moyenne, l'écart-type, ainsi que les valeurs minimale et maximale. L'ensemble de ces analyses a permis de déterminer la réponse du chou pommé aux différents amendements et d'identifier le traitement ayant donné les meilleurs résultats dans les conditions de Yangambi.

3. RESULTATS

3.1. Réponse de la plante -test

Effets des traitements sur le nombre de feuilles moyennes des plants

Le nombre de feuilles des plants a augmenté progressivement au cours de la période suivant le semis pour l'ensemble des traitements. Chez le chou pommé, les valeurs moyennes observées au cours des différentes périodes d'évaluation sont présentées sous forme de courbes dans la figure 1 ci-dessous, réalisée dans la Réserve de biosphère de Yangambi.

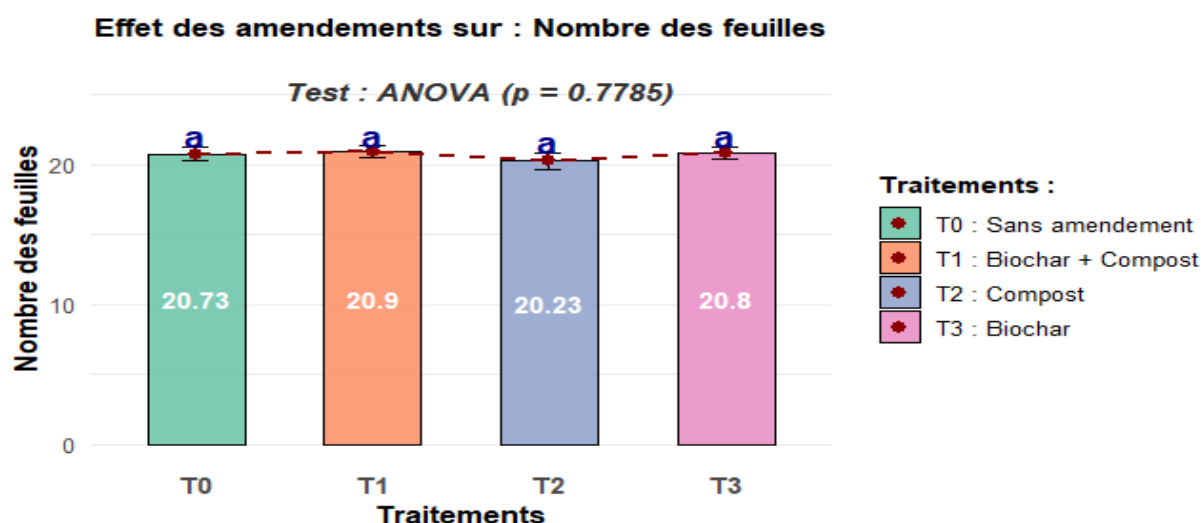


Figure 1. Évolution de la hauteur moyenne des plants (cm) suivant les traitements

L'analyse du nombre de feuilles du chou pommé n'a révélé aucune différence significative entre les traitements ($F = 0,365$; ddl = 3,116 ; $p = 0,778$). Les moyennes, comprises entre $20,23 \pm 2,69$ feuilles pour T_2 et $20,90 \pm 2,90$ feuilles pour T_1 , restent très proches, et le test de Tukey HSD les regroupe toutes dans la même classe statistique (« a »). Ces résultats indiquent que les amendements appliqués n'ont pas significativement influencé le développement foliaire dans les conditions de l'expérimentation. Le nombre de feuilles semble ainsi avoir été principalement déterminé par les caractéristiques variétales et les conditions environnementales générales. L'absence d'effet significatif sur ce paramètre n'exclut toutefois pas une influence des amendements sur d'autres composantes de la croissance et du rendement du chou pommé.

Effet des traitements sur le diamètre moyen au collet des plants

L'application des différents traitements a entraîné des variations de la vigueur des plants de chou pommé au cours du cycle cultural, comme l'indiquent les différences observées au niveau du diamètre au collet. Les valeurs moyennes enregistrées pour ce paramètre sont présentées sous forme de courbes à la figure 2 ci-après.

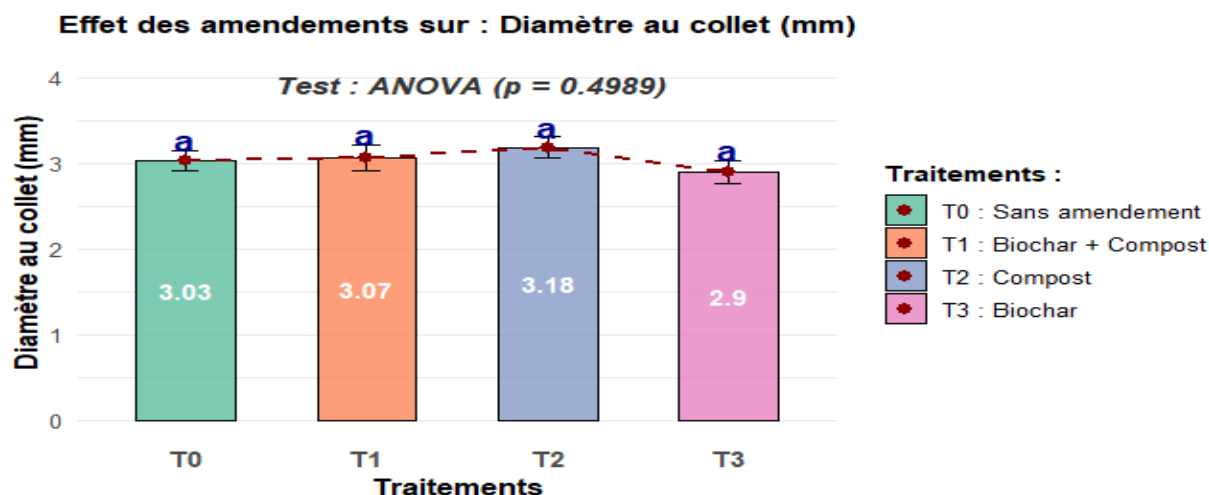


Figure 2. Évolution du diamètre moyen au collet des touffes (mm) de chou pommé en fonction des traitements

L'évaluation du diamètre au collet des plants de chou pommé n'indique pas non plus d'effet significatif des traitements appliqués ($F=0,795$; $df = 3,116$; $p=0,499$). La p-value étant supérieure au seuil critique de 0,05, nous concluons à l'absence d'impact des modalités expérimentales sur l'épuisement de la tige au niveau du collet. Les moyennes observées varient très peu d'un traitement à un autre : le traitement T₂ présente la moyenne la plus élevée (3,18 mm), suivi du traitement du T₁ (3,07 mm), du témoin T₀ (3,03 mm) et enfin du traitement T₃ (2,90 mm).

Le test de séparation des moyennes de Tykey HSD classe tous les traitements dans un seul et unique groupe homogène (groupe « a »). Le diamètre au collet est un indicateur clé de la vigueur de la tige et de la résistance mécanique de plants aux aléas climatiques (tels que le versement dû au vent).

Effet des traitements sur la hauteur de plants

La hauteur des plants a augmenté progressivement après semis pour l'ensemble des traitements, leurs valeurs moyennes sont illustrées par les courbes de la figure 3 ci-après dans la réserve de biosphère de Yangambi.

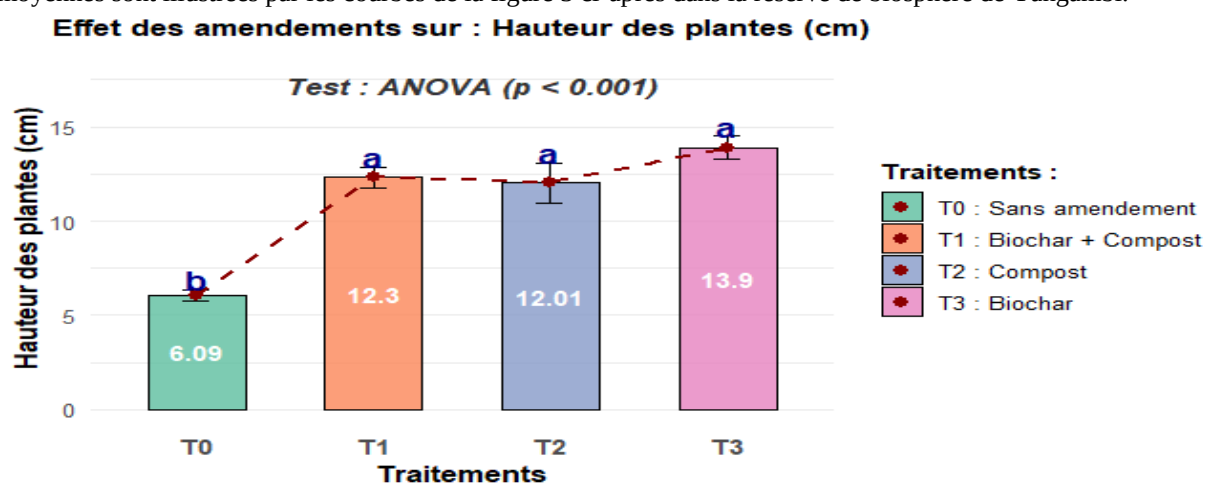


Figure 3. Évolution de hauteur des plants (mm) de chou pommé en fonction des traitements

Contrairement aux paramètres précédents, la hauteur des plants de chou pommé montre une réponse hautement significative aux différents traitements appliqués ($F=26,48$; $df = 3,116$; $p=4,04 \times 10^{-13}$, soit P inférieur 0,0001). La très faible valeur de la p-value permet de rejeter l'hypothèse nulle avec un niveau de confiance supérieur à 99%. La variation inter traitements (Sum Sq=1055) explique une part majeure de la variance totale par rapport à la variation résiduelle intra-traitement (Sum Sq=1541). Le test de post-hoc de Tykey HSD met en évidence deux groupe statistique distincts. Les traitements T₃ (13,90 cm), T₁ (12,30cm) et T₂ (12,01 cm) forment le groupe « a » et ne diffèrent pas significativement entre eux. En revanche, ils se distinguent tous très hautement du témoin non traité T₀ (6,09 cm), seul du groupe « b ».

Effet des traitements sur le poids frais de chou pommé (%)

Le poids frais représente l'un des premiers indicateurs qui permet de comparer les traitements appliqués aux cultures. Les pourcentages moyens de cette variable sont illustrés dans la figure 4 ci-après dans la réserve de biosphère de Yangambi, RDC.

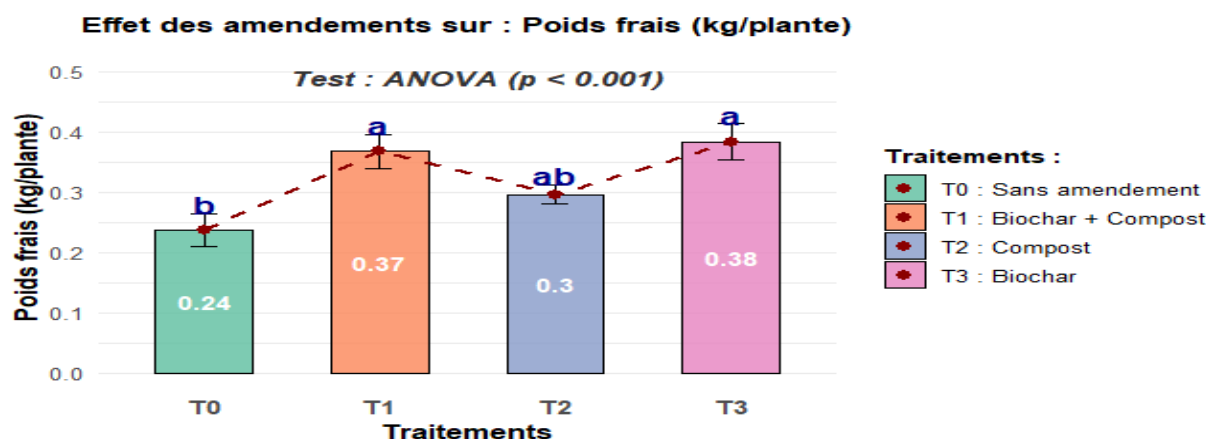


Figure 4. Évolution des poids frais moyen au des plants (kg) de chou pommé en fonction des traitements

L'action des différents traitements sur le poids frais de chou pommé, en fonction de leur période de développement, est présentée à la figure 4. Les différents traitements apportés, aussi bien durant cette période, ont influencé les poids frais de chou pommé. Les trois traitements soient amendements organiques (biochar + compost, compost et biochar) ont agi de manière similaire durant cette période mais, différemment au sein d'elles sur des plants de chou pommé.

Selon les résultats, le biochar à T₃ a permis d'obtenir un poids plus élevé (0,38 kg). Cependant, le faible poids est obtenu avec le sol sans amendement (0,24 kg). Dans l'ensemble, le poids moyen des plants de chou pommé oscille entre 0,24 kg sous le sol qui n'a pas reçu l'amendement à T₀ et 0,38 kg avec le sol ayant reçu le biochar à T₃.

L'analyse de variance révèle un effet très hautement significatif sur le poids frais moyen de la pomme des traitements ($F=6,868$; $df=3,116$; $p=0,000268$, soit $p < 0,001$). Ce résultat confirme l'efficacité contrastée des modalités d'essai sur l'accumulation des matières fraîches.

Effet des traitements sur la circonférence de chou pommé

La circonférence de chou pommé des plants a varié progressivement après semis pour l'ensemble des traitements, par le chou pommé leurs valeurs moyennes sont illustrées par les courbes de la figure 5 ci-après dans la réserve de biosphère de Yangambi.

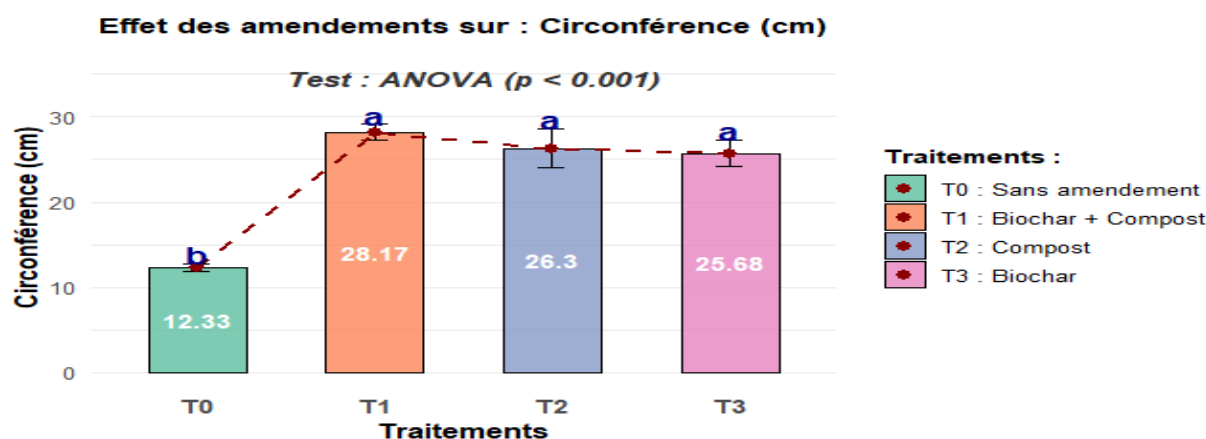


Figure 5. Évolution des circonférences moyen au des plants (cm) de chou pommé en fonction des traitements

Sur la figure 5 ci-haut, les résultats montrent une augmentation continue de circonférence de chou pommé, les moyennes de la circonférence de chou pommé observées étaient de : T₁ = 28, T₂ = 26,30, T₃ = 25,68, et T₀ = 12,33. La figure 5 montre l'accroissement en circonférence des plants de chou pommé selon les différents traitements. L'accroissement en circonférence des plants de chou pommé a varié entre 12,33 cm et 28,17 cm. L'accroissement minimale de la circonférence de chou pommé (12,33 cm) a été enregistrée au niveau des plants qui n'a pas connu

l'amendement T_0 et la maximale (28,17 cm), observée au niveau des plants ayant reçu biochar + compost comme traitement au temps T_1 .

L'accroissement moyen des plants de chou pommé qui ne sont pas traités avec biochar +compost, compost et biochar est significativement plus élevé que les plants n'ayant pas reçus le traitement (sol sans amendement).

Statistiquement, l'accroissement en circonférence des plants de chou pommé traités avec le traitement ne sont pas identiques.

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

La longueur moyenne des feuilles montre une réponse positive nette chez les plants de chou pommé aux différents traitements appliqués. Les variations des valeurs moyennes de la longueur des feuilles observées sont illustrées par les histogrammes la figure 6 ci-après.

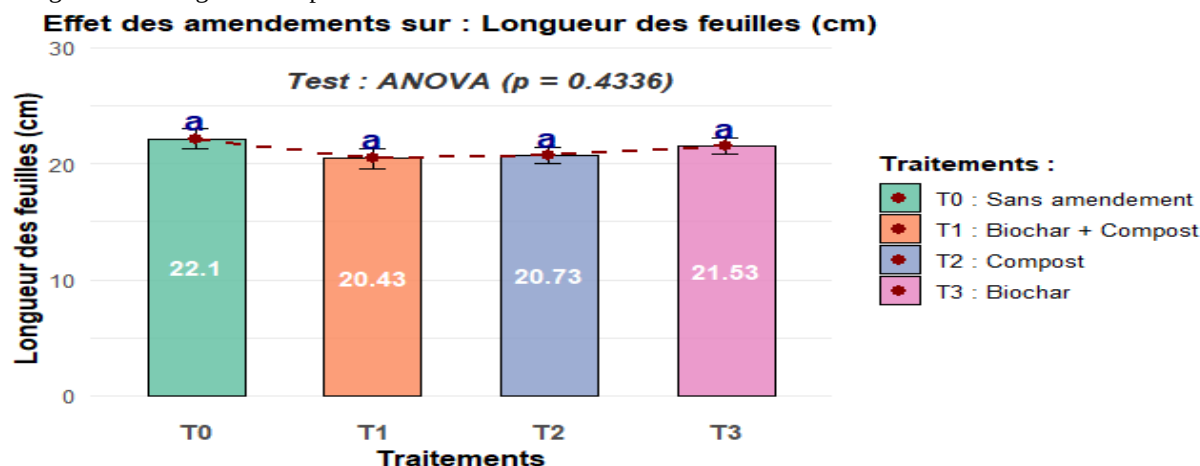


Figure 6. Variations de la longueur moyenne des feuilles (cm) de la ciboulette suivant les traitements

L'action des différents traitements sur la longueur moyenne des feuilles des plants de chou pommé, l'effet des traitements sur la longueur de feuilles des plants de chou pommé est présenté dans la figure 6. Les plantes de parcelles ayant été enrichies avec les amendements organiques n'ont pas eu une croissance significative sur la longueur de leurs feuilles par rapport au témoin. Dans l'ensemble, la longueur des feuilles oscille entre 20,73 cm avec le compost à T_2 et 22,1 cm avec le biochar + compost à T_1 . L'analyse statistique des données a montré que chaque traitement a permis d'élever significativement ($p < 0,05$) la longueur des feuilles des plants de chou pommé aux différents temps d'observation. Cette supériorité de T_0 montre une meilleure disponibilité des nutriments et une amélioration des propriétés physicochimiques du sol grâce à l'action aux arrières effets ou culture précédente.

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 chou pommé observée dans la Réserve de Biosphère de Yangambi sont illustrées par les histogrammes de la figure 7 ci-après.

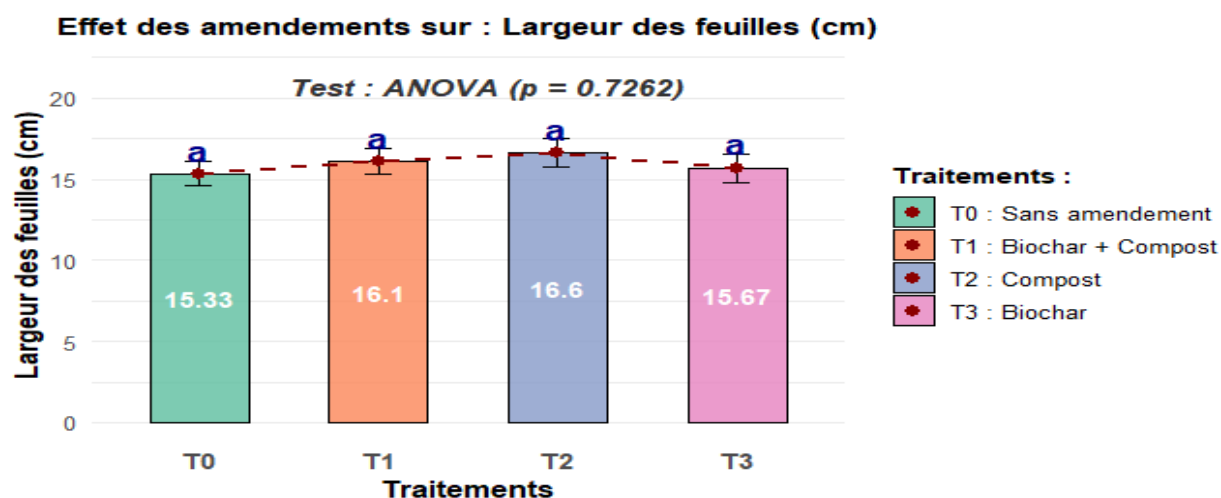


Figure 7. Variations de la largeur moyenne (cm) des feuilles de chou pommé en fonction des traitements

L'analyse de variance réalisée sur la largeur des feuilles révèle une absence de différence significative entre les quatre traitements évalués ($p = 0,726$). Avec cette p-value nettement supérieur au seuil habituel de 0,05, les données ne fournissent aucune preuve d'un effet positif ou négatif des traitements sur le développement transversal du limbe foliaire. Les moyennes calculées sont très proches les unes des autres : 16,60 cm pour T_2 ; 16,10 cm pour T_1 ; 15,67 cm pour T_1 ; 15,67 cm pour T_3 et 15,33 cm pour le témoin T_0 . La structuration en groupes de Tukey HSD confirme ce résultat en attribuant le groupe « a » à la totalité des modalités expérimentales.

Effet des traitements sur la surface foliaire moyenne (cm²)

La surface foliaire constitue l'indicateur le plus pertinent du potentiel photosynthétique de la plante et la production de biomasse. Les différentes variations observées dans la Réserve de Biosphère de Yangambi sont illustrées par les histogrammes de la figure 8 ci-après.

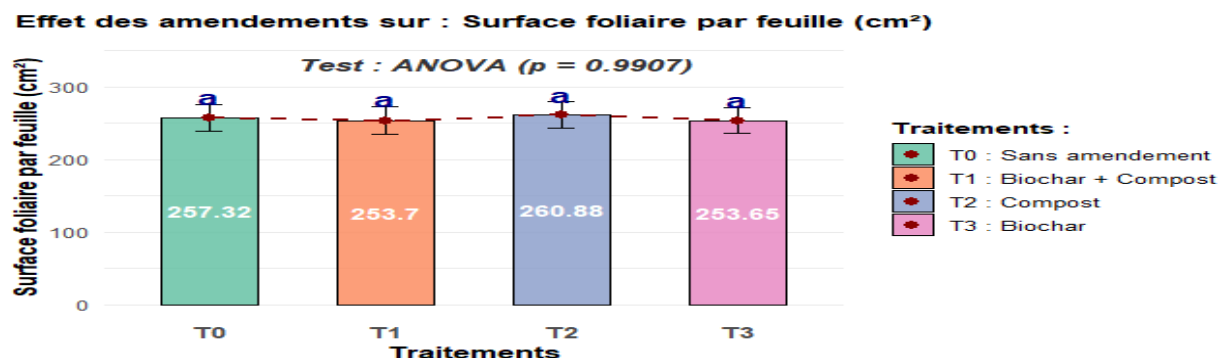


Figure 8. Variations des valeurs moyennes de la surface foliaire (cm²) de la ciboulette sous les traitements

La surface foliaire constitue l'indicateur le plus pertinent du potentiel photosynthétique de la plante et production des biomasses. Les résultats montrent que $T_0 = 257,32$ cm², $T_1 = 253,70$ cm², $T_2 = 260,88$ cm² et $T_3 = 253,65$ cm². Par rapport au témoin, les augmentations sont de 260,88 cm² pour compost à T_2 . Cette forte augmentation explique une amélioration substantielle de la table ou plateau photosynthétique de chou pommé, plant-test, ce qui s'est traduit par une accumulation plus importante de biomasse et potentiellement, par un meilleur rendement. La supériorité du traitement compost à T_2 s'explique sans doute par l'effet les composts disponibilise les éléments nutritifs au sol en profit de la plante d'une manière paisible et progressive. Le biochar améliore la rétention de l'eau, la capacité d'échange cationique actuelle 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 test de Tukey HSD attribue logiquement la lettre « a » à toutes modalités.

Effet des traitements sur le rendement (t/ha) de chou pommé

Le rendement pour une production agricole est un indicateur essentiel qui mesure la quantité de la produit récolté/unité de surface. Les différentes variations des valeurs moyennes des effets des traitements sur le rendement de chou pommé observées dans la Réserve de Biosphère de Yangambi sont illustrées par les histogrammes de la figure 9 ci-après.

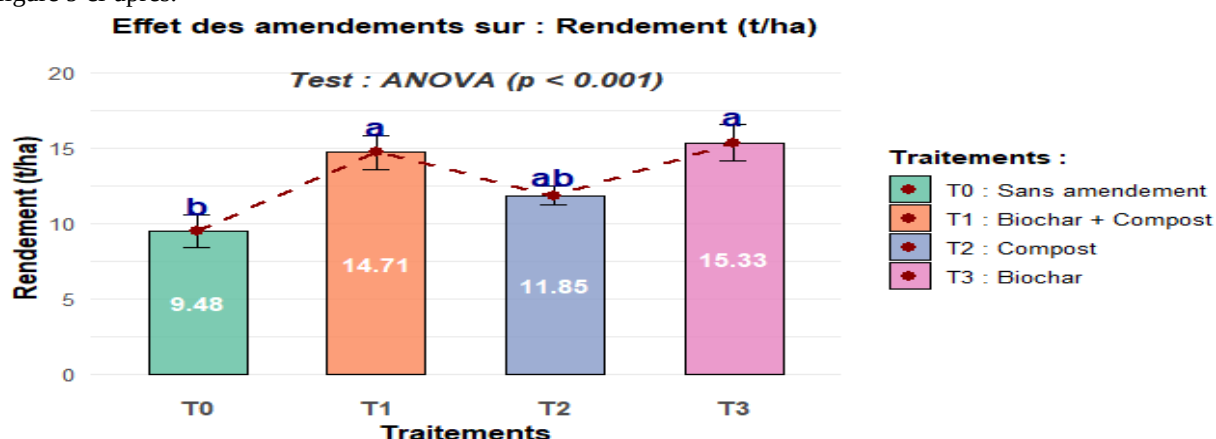


Figure 9. Variations des rendements moyens observés de chou pommé en fonction des traitements

Les résultats sur la figure affichée ci-haut montre le rendement surfacique exprimé en tonnes par hectare (t/ha) constitue le critère agronomique et économique

majeur de l'étude. Comme pour le poids frais individuel dont il est directement dérivé, l'ANOVA indique une différence hautement significative entre

les traitements ($df=3,116$; $p=0,000268$, soit $p < 0,001$).

La structuration des moyennes par le test de Tukey HSD fait ressortir la même gradation statistique en groupes « a », « ab » et « b ».

Groupe a (Rendements élevés) : Les traitements T_3 (15,33 t/h) et T_1 (14,71 t/ha) offrent les meilleures performances agronomiques ; Groupe ab (Rendements intermédiaire) : Les traitements T_2 réalise une performance moyenne de 11,85 t/ha ; Groupe b (Faible rendements) : Les témoin non traité T_0 ferme la marche avec un rendement de 9,48 t/ha).

Sur le plan de recommandation vulgarisée au milieu agricole, les traitements T_3 et T_1 permettent d'accroître la productivité parcellaire de plus de 5,8 à 5,2 tonnes par hectare par rapport au témoin T_0 (soit un gain relatif d'environ +61% pour T_3). T_3 production de chou pommé dans les conditions expérimentales de l'essai.

Le rendement maximal obtenu sous T_3 a atteint 15,33 t/ha contre 9,48 t/ha pour le témoin, soit une augmentation de 38 %. 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 montrent que les amendements organiques ont influencé différemment les performances phytotechniques du chou pommé (*Brassica oleracea* var. *capitata*) sur les sols ferrallitiques de Yangambi. La réponse a varié selon le paramètre considéré : le nombre de feuilles n'a pas présenté de différence significative entre les traitements ($F = 0,365$; $ddl = 3,116$; $p = 0,778$), alors que le diamètre au collet, la largeur et la surface foliaires, la hauteur des plants, le poids frais et le rendement ont montré des réponses plus différenciées. Cette variabilité indique que les amendements n'agissent pas uniformément sur les différents processus de croissance de la culture.

L'absence d'effet significatif sur le nombre de feuilles suggère que ce paramètre a été relativement peu sensible aux amendements dans les conditions de l'expérimentation. Son évolution pourrait davantage dépendre des caractéristiques variétales et des conditions environnementales générales. En revanche, les meilleures performances enregistrées sous compost pour certains paramètres foliaires, notamment la largeur et la surface foliaires, peuvent être liées à la libération progressive des éléments nutritifs au cours de la minéralisation de la matière organique. Le compost constitue notamment une source d'azote, de phosphore et de potassium nécessaires à la formation de la biomasse et au développement du feuillage. Edwards *et al.* (2000) soulignent à cet égard l'importance du compost comme source d'éléments nutritifs progressivement disponibles pour les cultures.

Le biochar s'est particulièrement distingué pour la hauteur des plants, le poids frais et le rendement. Cette réponse pourrait être liée à son rôle dans l'amélioration de l'environnement physico-chimique du sol plutôt qu'à son seul apport direct en nutriments. Selon Lehmann et Joseph (2015), sa structure poreuse et sa grande surface spécifique favorisent la rétention des éléments nutritifs et peuvent améliorer les conditions du milieu racinaire. Dans les conditions tropicales humides de Yangambi, cette propriété est particulièrement intéressante en raison du risque élevé de lixiviation. Les observations de Mulaji (2010) et d'Andriamananjara (2002) montrent également que les matériaux carbonés peuvent contribuer à l'amélioration de l'acidité des sols, ce qui peut favoriser la disponibilité de certains éléments nutritifs.

Les performances obtenues avec le biochar rejoignent celles rapportées par Soro (2018), qui a observé des effets positifs du biochar sur certains paramètres de développement du riz, notamment la floraison et la largeur des feuilles. Toutefois, la réponse au biochar peut varier selon la culture, le type de sol, la matière première utilisée, la dose appliquée et les conditions environnementales. Il convient donc de considérer ces convergences comme des indications générales plutôt que comme une relation universelle.

L'effet du compost doit également être interprété en tenant compte de l'apport d'urée à 48 %, qui a pu renforcer la disponibilité de l'azote et contribuer au développement végétatif. Cependant, dans les milieux tropicaux humides, une disponibilité importante et rapide des nutriments peut être suivie de pertes par lessivage. Grogan *et al.* (2018), Alvarez (2005) et Giller *et al.* (2002) soulignent ainsi l'importance de la gestion de la disponibilité des nutriments pour maintenir durablement la fertilité des sols. La minéralisation progressive du compost issu des plantes envahissantes présente à cet égard un intérêt, puisqu'elle peut assurer un apport plus régulier de nutriments au cours du cycle cultural.

La faible performance du témoin peut être associée aux contraintes initiales des sols ferrallitiques de Yangambi. Mukalay *et al.* (2008) indiquent que l'acidité, la toxicité de certains éléments et les déficiences en Ca, Mg, P, K, B et Zn peuvent limiter la croissance des cultures. L'amélioration observée dans les traitements amendés suggère donc que les apports organiques ont contribué à atténuer certaines contraintes du sol. Cette tendance rejoint les observations de Foidl *et al.* (2001), selon lesquelles la productivité végétale est fortement influencée par le niveau de fertilisation.

L'association biochar-compost présente un intérêt particulier en raison de la complémentarité de leurs fonctions. Le compost fournit principalement de la matière organique et des nutriments relativement disponibles, tandis que le biochar peut contribuer à leur rétention dans le sol. Agegnehu *et al.* (2016) ont montré que cette association pouvait améliorer les propriétés du sol et stimuler la production végétale.

dans les systèmes agricoles tropicaux. Toutefois, les résultats de la présente étude ne permettent pas d'affirmer que l'association est systématiquement supérieure aux amendements utilisés individuellement pour tous les paramètres. La réponse dépend plutôt de la variable considérée.

L'utilisation du bambou local pour la production de biochar et des plantes envahissantes pour la production de compost constitue néanmoins une perspective intéressante pour Yangambi. Cette valorisation de biomasses locales s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et pourrait contribuer à réduire la dépendance aux intrants minéraux tout en améliorant la fertilité des sols. Toutefois, l'efficacité à long terme de cette stratégie reste à confirmer.

Enfin, l'interprétation des résultats doit tenir compte de certaines limites, notamment la durée de l'expérimentation, limitée à une seule campagne culturale, et l'absence de suivi détaillé de l'évolution des propriétés chimiques et biologiques du sol. Jeffery *et al.* (2011) montrent que les effets du biochar peuvent varier dans le temps selon les caractéristiques du sol et les conditions expérimentales. Des essais pluriannuels intégrant le suivi du pH, du carbone organique, de l'azote, du phosphore, des bases échangeables, de la capacité d'échange cationique et des indicateurs biologiques du sol seraient donc nécessaires pour confirmer la durabilité des effets observés.

Dans l'ensemble, les résultats indiquent que le compost et le biochar présentent des effets complémentaires sur les performances du chou pommé. Le compost a davantage favorisé certains paramètres liés au développement foliaire, tandis que le biochar s'est montré particulièrement intéressant pour la vigueur, la biomasse et le rendement. L'association des deux amendements constitue ainsi une option prometteuse, mais son efficacité doit être appréciée selon le paramètre considéré et confirmée par des essais de plus longue durée.

5. CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'effet du biochar de bambou et du compost issu de plantes envahissantes sur les performances phytotechniques et le rendement du chou pommé (*Brassica oleracea* var. *capitata*) dans les conditions pédoclimatiques de Yangambi-centre. Les résultats obtenus montrent que les amendements organiques ont influencé différemment les paramètres de croissance et de rendement selon le traitement considéré.

Le rendement le plus élevé a été obtenu sous le traitement T₃, avec 15,33 t/ha, contre 9,48 t/ha pour le témoin, soit une augmentation de 61,7 % par rapport à celui-ci. Cette amélioration met en évidence le potentiel agronomique des amendements organiques, particulièrement de l'association biochar-compost, pour améliorer la productivité du chou pommé sur les sols ferrallitiques de Yangambi. Toutefois, l'absence de différence significative pour certains paramètres,

notamment le nombre de feuilles, montre que la réponse du chou pommé aux amendements varie selon le caractère phytotechniques considéré.

Les résultats suggèrent que le biochar de bambou peut contribuer à améliorer les conditions de fertilité du sol et à favoriser la croissance et le rendement de la culture. Le compost issu des plantes envahissantes présente également un intérêt en tant que source de matière organique et de nutriments progressivement disponibles. Leur association pourrait ainsi permettre de combiner l'apport nutritif du compost avec la capacité du biochar à retenir certains éléments dans le sol, ce qui est particulièrement intéressant dans les conditions tropicales humides de Yangambi.

Sur le plan pratique, la valorisation du bambou et des plantes envahissantes pour produire des amendements organiques constitue une approche agro-écologique intéressante, susceptible de réduire la dépendance aux engrais minéraux et de contribuer à une meilleure gestion des ressources locales. Elle offre également une possibilité de développer des techniques de fertilisation plus accessibles aux producteurs maraîchers.

Cependant, les résultats obtenus sur une seule campagne culturale doivent être interprétés avec prudence. Des études complémentaires sur plusieurs cycles culturaux sont nécessaires pour confirmer la stabilité des effets observés et déterminer les doses et modalités d'application les plus efficaces. Il serait également pertinent de caractériser les propriétés physicochimiques et fonctionnelles du biochar, de suivre l'évolution de la fertilité du sol et d'évaluer l'efficacité économique des différents traitements.

En perspective, il serait donc recommandé de : (i) caractériser les propriétés physicochimiques et fonctionnelles du biochar de bambou ; (ii) évaluer ses effets résiduels sur plusieurs cycles de culture du chou pommé ; (iii) optimiser les doses et les modalités d'association du biochar et du compost ; et (iv) développer des techniques de fertilisation simples, accessibles et économiquement rentables pour les producteurs. Ces travaux contribueraient à mieux valoriser les ressources locales et à promouvoir une production maraîchère plus durable dans les conditions agro-écologiques de Yangambi.

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, technique et financier ayant permis la réalisation de cette recherche-action ainsi que la valorisation et la diffusion de ses résultats à travers la présente publication.

Cette recherche et la publication qui en découle ont bénéficié du soutien du 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

- Agegehu 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>
- Alfred E., Hartemink B.J., Johnston J.N., O'Sullivan & Poloma S., 2005. Nitrogen use efficiency of sweet potato in the humid tropics. *Field Crops Research*, 93(2-3), 294–304.
- Alvarez R., 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management*, 21, 38–52.
- Andriamananjara A., 2002. *Système de culture à rotation Voandzou Riz pluvial (Oryza sativa) sur les hautes terres de Madagascar. Rôle du Voandzou (Vigna subterranea) sur la biodisponibilité du phosphore dans les ferralsols*. Thèse Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Madagascar, 185 p.
- Baisch P., Mohan D. & Mukherjee A., 2024. Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts. *Sci. Total Environ.*, 780, 146274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146274>
- 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>
- Bernard V. & Ken E. Giller, 2006. Popular myths around Integrated Soil Fertility Management in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(1-2), 34–46
- Bikela N.A., 2007. *Essai comparatif de la qualité fertilisante d'Azolla cristata et d'autres fumures (fiente, lisier et urée)*. Licence en science, Institut supérieur pédagogique, Gombe, Kinshasa, 30 p.
- FAO, 1980. *Les engrais et leur application*. FAO, Rome, Italie, 51 p.
- Foidl N., Makkar H.P.S. & Becker K., 2001. *Potentiel de Moringa Oleifera en agriculture et dans l'industrie*, 39 p. Disponible sur <http://www.Moringanews.Org>. (Site consulté Le 12/10/2022).
- Giller K.E., Cadisch G. & Palm C., 2002. The North-South divide: organic wastes or resources of nutrient management. *Agronomy*, 22, 703–709.
- 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.
- Islam K.R. & Ray R. Weil, 2002. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 79(1), 9–16 [tps://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0)
- 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.
- John J. Ewel, Michael J., Mazzarino & Cory W. Berish, 1991. Tropical soil fertility changes under monocultures and successional ecosystems. *Ecological Applications*, 1(3), 289–302
- 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.
- 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*, 177–178, 171–178.
- LR G., Maity J.P., López D.L., Cirelli A.F., Pérez-Carrera A., Morales-Simfors N., Alarcón-Herrera M.T., 2018. *Evaluation de l'influence d'Azolla filiculoides sur la production du riz (Oryza sativa variété Wita 9) et du Tilapia (Oreochromis niloticus) en rizipisciculture dans la zone de Bonoufla (Haut-Sassandra, centre Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Mémoire de master en bioressources et agronomie, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa (Côte d'Ivoire), 51 p.
- Mukalay M.J., Shutcha M.N., Tshomba K.J., Mulowayi K., Kamb C.F. & Ngongo L.M., 2008. Causes d'une forte hétérogénéité des plants dans un champ de maïs dans les conditions pédoclimatiques de Lubumbashi. *Presses universitaires de Lubumbashi, Annales Faculté des Sciences Agronomiques*, 1 (2), 4–11.
- Mulaji K.C., 2010. Utilisation des composts de biodéchets ménagers pour l'amélioration de la fertilité des sols acides de la province de Kinshasa (République Démocratique du Congo). Thèse de doctorat en Agro-Biotechnologie, UFR Biotechnologie, Université de Liège-Gembloux, Belgique, 220 p.
- Ojetayo A.E., Olaniyi J.O., Mougeot L. & Abdou F., 2011. Effect of fertilizers types on nutritional quality of two cabbage varieties before and after storage. *Journal of Applied Biosciences*, 48, 3322 – 3330.
- Soro D., Wang A.S., Angle J.S., Chaney R.L., Delorme T.A., Reeves R.D., 2024. Soil pH Effects on Uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant Soil*, 281, 325–337. <https://doi.org/10.1007/s11104005-4642-9>