



CO-COMPOSTAGE DU CHARBON DE BOIS AVEC LA FIENTE DE POULES : UNE STRATEGIE AGROECOLOGIQUE POUR ACCROITRE LE RENDEMENT DU GOMBO EN SOL ACIDE

MAMBAKA BUNZE Nathan (1*), FALASI NITU Reagan(2) , MALEWA NSATU Hertivie (1), MASIKA TUTONDELE Jethro(1), MAYISA MAYILUKILA Bill-Clinton (1), NZUIKI MBUNGU Alphonse (3), KIWIDI DIANZENZA Loïs (1), NSOMBI DIAMBI Priscille (1), MAYEMBA NSALAMBI Chadrack (1)

(1) Faculté des sciences agronomiques et environnement, Université Kongo, Mbanza-Ngungu, RDC

(2) Faculté des sciences agronomiques et environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, RDC

(3) Faculté des sciences agronomiques et environnement, Université Président Joseph Kasa Vubu, Boma, RDC

Résumé : L'étude visait à évaluer l'effet combiné du charbon de bois activé et des engrains minéraux sur la croissance et rendement du gombo (*Abelmoschus esculentus*) cultivé sur un sol acide de Mbanza-Ngungu (RDC). Un essai en blocs complets randomisés comprenant 11 traitements a été conduit avec différentes doses de charbon de bois activé (co-composté avec fiente de volaille pendant 0, 15 ou 30 jours) et d'engrais minéraux (NPK 12-24-12 + urée). Les résultats révèlent une amélioration significative des paramètres de croissance et de production par rapport au témoin. Le traitement à base de charbon de bois activé seul maturé 15 jours (T3) a donné le rendement le plus élevé (1692,2 kg/ha), surpassant les traitements combinés. Ces résultats indiquent que le charbon de bois activé, en particulier après 15 jours de compostage, constitue un amendement efficace pour améliorer la productivité du gombo en sol acide. Son utilisation pourrait représenter une solution agroécologique adaptée aux contraintes des petits producteurs en zone tropicale.

Mots-clés : Charbon de bois activé, engrais minéraux, gombo, sol acide, rendement, fertilité durable.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.18412246>

1 Introduction

L'augmentation durable de la productivité agricole dans les zones tropicales demeure un défi majeur, notamment dans les régions où les sols sont fortement altérés, acides, pauvres en matière organique et en éléments nutritifs essentiels (Sanchez, 2019). En Afrique subsaharienne, plus de 75 % des sols cultivés présentent des contraintes de fertilité majeures, notamment un faible pH, une faible capacité d'échange cationique (CEC) et des carences en azote, phosphore et potassium (Vanlauwe *et al.*, 2017; Jones *et al.*, 2021). Dans ce contexte, l'amélioration de la fertilité des sols par des approches innovantes et durables est devenue une priorité stratégique pour la sécurité alimentaire.

Les engrains minéraux constituent une solution rapide et efficace pour combler les déficits nutritifs, mais leur accessibilité économique et leur durabilité environnementale sont discutables dans les contextes paysans (FAO, 2022). De plus, l'application continue d'engrais minéraux, sans apport organique, peut accentuer l'acidification des sols, dégrader la structure et réduire la biodiversité microbienne (Bünemann *et al.*, 2018; Lal, 2020). Pour remédier à cela, plusieurs travaux recommandent l'utilisation combinée d'intrants minéraux et organiques pour améliorer à la fois la productivité des cultures et la santé des sols (Palm *et al.*, 2001; Njeru *et al.*, 2023).

Le charbon de bois activé, a émergé comme un amendement organique prometteur. Il est reconnu pour sa capacité à améliorer la rétention d'eau, augmenter la capacité d'échange cationique, stabiliser les nutriments, et stimuler l'activité microbienne du sol (Lehmann & Joseph, 2015; Agegnehu *et al.*, 2016; Ye *et al.*, 2020). Lorsqu'il est activé par compostage ou enrichissement organique (ex. fientes de volaille), le charbon de bois activé peut agir comme une source d'éléments nutritifs à libération lente, renforçant son effet bénéfique sur la croissance des cultures (Méndez *et al.*, 2022; Chintala *et al.*, 2024).

Des études récentes menées dans différentes régions tropicales ont démontré que l'application combinée de biochar et d'engrais minéraux augmente significativement les rendements de cultures comme le maïs, le sorgho, le niébé et les légumes-feuilles, tout en réduisant les pertes par lessivage et en améliorant la durabilité des systèmes de production (Agegnehu *et al.*, 2016; Nartey *et al.*, 2023; Wairiu *et al.*, 2024). Cependant, les données sur l'effet combiné du charbon de bois activé et des engrais chimiques sur la production du gombo (*Abelmoschus esculentus*), une culture maraîchère à haute valeur nutritive et économique en Afrique centrale, restent très limitées.

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer les effets de l'apport combiné de charbon de bois activé (co-composté avec fiente de volaille) et d'engrais minéraux sur la croissance végétative et le rendement du gombo dans un sol acide de la région de Mbanza-Ngungu (RDC). L'objectif est de déterminer des combinaisons d'amendements économiquement viables et agroécologiquement durables pour accroître la productivité dans des conditions édapho-climatiques contraignantes.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Zone d'étude

L'étude a été réalisée du 27 avril au 24 août 2024 sur le site de Nienge, dans le secteur de Boko (territoire de Mbanza-Ngungu), province du Kongo Central, en République Démocratique du Congo. Le climat local est de type tropical humide à deux saisons des pluies et deux saisons sèches, classé AW4 selon Köppen, avec une moyenne annuelle de température stable et une pluviosité bimodale (Alain, 2011). Le relief est accidenté avec des formations calcaires, des collines érodées et quelques vallées fertiles. Les sols dominants sont des Arénosols ferralliques rubiques (dystriques), avec une faible fertilité chimique, notamment en phosphore et potassium assimilables sur les plateaux (WRB, 2007). L'analyse du sol avant mise en culture a révélé un pH très acide (4,58), une faible disponibilité en phosphore (13 ppm), un azote ammoniacal de 106,5 ppm et un potassium échangeable de 80 ppm. La végétation environnante est constituée de savanes arbustives (*Pentaclethra eetveldeana*, *Elaeis guineensis*) et de forêts-galeries à *Crosopteryx febrifuga* et *Hyparrhenia diplandra* (Habiyaremye *et al.*, 2011).

2.2 Matériels d'étude

Le matériel végétal utilisé était la variété Clemson Spineless d'*Abelmoschus esculentus* (gombo), fournie par la société Technisem. Cette variété est reconnue pour sa vigueur, sa résistance aux maladies et ses performances en conditions tropicales. Les engrais NPK12-24-12, l'urée et le charbon de bois activé avaient servi de fertilisants respectivement minéraux et organique.

2.3 Dispositif expérimental et traitements

L'essai a été conduit selon un dispositif en blocs complets randomisés (BCR) avec 11 traitements et 3 répétitions, soit un total de 33 parcelles de 7,5 m² (3 m × 2,5 m). Le champ couvrait une superficie de 361,5 m².

Les traitements appliqués étaient les suivants :

Tableau 1. Détails des différents traitements appliqués

Code	Description	Dose appliquée
T0	Témoin (aucun amendement)	—
T1	Engrais minéraux seuls (NPK 12-24-12 + urée)	200 kg/ha de NPK + 120 kg/ha d'urée
T2	Charbon de bois activé à 0 jour	24000 kg/ha
T3	Charbon de bois activé à 15 jours	24000kg/ha
T4	Charbon de bois activé à 30 jours	24000kg/ha
T5	T2 + Engrais minéraux dose complète	24000kg/ha + 200 kg/ha de NPK + 120 kg/ha d'urée
T6	T3 + Engrais minéraux dose complète	idem
T7	T4 + Engrais minéraux dose complète	idem
T8	T2 + Engrais minéraux demi-dose	24000kg/ha + 100 kg/ha de NPK + 60 kg/ha d'urée
T9	T3 + Engrais minéraux demi-dose	idem
T10	T4 + Engrais minéraux demi-dose	idem

Préparation du charbon activé

Le charbon de bois a été activé par co-compostage avec de la fiente de volaille selon la méthode de Lehmann & Joseph (2009). Un mélange de 300 kg de poussière de charbon et 300 kg de fiente de poule (équivalent à 12 t/ha de chaque partie) a été humidifié, couvert, et retourné tous les 7 jours pendant 0, 15 ou 30 jours selon les traitements.

2.4 Conduite culturelle

Le sol a été préparé manuellement (désherbage, labour, piquetage). Un chaulage correctif a été effectué pour augmenter le pH à l'aide de 9520 kg/ha de chaux calcaire. Les analyses du sol ainsi que le besoin en chaux ont été réalisé au laboratoire pédologique de l'Université Kongo. Le semis a été réalisé le 15 juin 2024, simultanément avec l'épandage du charbon activé, dans des poquets de 3 cm, à raison de 3 graines/poquet, selon un espacement de 50 cm × 50 cm (990 plants pour 361,5 m²). Les engrains minéraux ont été appliqués en prélevée (le 14 juin) de façon localisée autour du pied: 5 g/poquet de NPK + 3 g/poquet d'urée (dose pleine); 2,5 g de NPK + 1,5 g d'urée (demi-dose). Un traitement phytosanitaire a été réalisé le 15 juin avec un acaricide à raison de 50 ml/16 L d'eau.

2.5 Paramètres mesurés

Les observations ont porté sur les paramètres suivants:

- Agronomiques : taux de levée, diamètre au collet (mesuré toutes les deux semaines jusqu'à la floraison)
- Production: nombre total de fruits par parcelle, poids total des fruits, nombre de plantes récoltées

La récolte s'est échelonnée du 13 au 24 juillet 2024 (7 récoltes à une semaine d'intervalle).

2.6 Analyse statistique

Les données ont été vérifiées pour la normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk) et l'homogénéité des variances (test de Bartlett). Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée avec le logiciel R v4.4.1 (R Core Team, 2024). Les comparaisons de moyennes ont été effectuées avec le test de Tukey HSD via les packages MASS (Venables & Ripley, 2002) et multcomp. Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$.

2.7 Figure

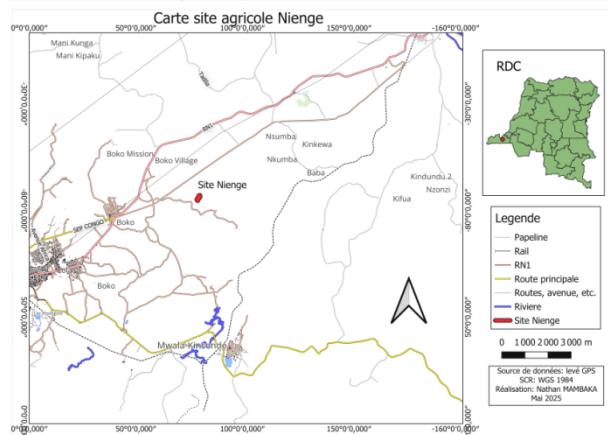


Figure 1. Site agricole Nienge. (Source, carte personnelle)

3 Résultats et discussion

3.1 Résultats

3.1.1 Paramètres agronomiques

Les résultats liés au taux de levée et au diamètre au collet sont présentés dans le tableau 2. Le taux de levée a varié entre 80,5 % (T0) et 91,7 % (T4), sans différence significative entre les traitements ($p = 0,9712$). Ce résultat suggère que ni les amendements organo-minéraux ni le charbon activé n'ont influencé significativement la germination dans les conditions pédo-climatiques de l'étude.

En revanche, le diamètre au collet a montré des différences significatives entre les traitements ($p = 0,0145$). Le traitement T2 (charbon activé non précomposté) a enregistré le diamètre moyen le plus élevé (0,733 cm), suivi de T1 (engrais minéraux seuls) et T3 (charbon activé précomposté 15 jours). Les plus faibles diamètres ont été observés pour T0 (témoin) et T10 (charbon activé à 30 jours + demi-dose engrais), ce qui reflète l'effet positif de l'amendement organique jeune sur le développement initial du système racinaire.

Ces résultats indiquent que le charbon de bois activé, utilisé seul ou en synergie avec les engrais, améliore la structure du sol et les conditions rhizosphériques (Glaser *et al.*, 2002), ce qui favorise un développement végétatif accru.

Tableau 2. Evaluation des effets des traitements (T0 à T10) sur les paramètres végétatifs du gombo

Traitements	Taux des levées (%)	Diamètre au collet (cm)
T0	80.500±11.100A	0.400±0.057B
T1	83.267±8.333A	0.600±0.000AB
T2	83.300±12.733A	0.733±0.133A
T3	88.867±5.566A	0.533±0.033AB
T4	91.667±8.333A	0.566±0.033AB
T5	88.833±2.766A	0.500±0.000AB
T6	80.533±5.533A	0.600±0.000AB
T7	86.100±13.900A	0.566±0.033AB
T8	91.633±4.820A	0.566±0.033AB
T9	88.833±2.766A	0.600±0.000AB
T10	83.267±8.333A	0.466±0.033B
P (5%)	0.971	0.015

Lettres différentes indiquent des différences significatives au seuil de 5 % (Test de Tukey HSD).

3.1.2 Paramètres de production

Les résultats (tableau 3) montrent une influence statistiquement significative des traitements sur les trois paramètres de production mesurés ($p < 0,01$), à savoir : le nombre de plantes récoltées à l'hectare, le nombre de fruits par hectare et le rendement en kg/ha. Globalement, tous les traitements ont induit une amélioration significative par rapport au témoin (T0), ce qui souligne l'impact positif de l'amendement organo-minéral sur un sol initialement très pauvre et acide.

Le traitement T3 (charbon activé seul à 15 jours) a produit 276 667 fruits/ha et un rendement de 1 692,2 kg/ha, tandis que le traitement T6 (charbon activé 15 jours + engrais minéraux, dose complète) a généré 376 666 fruits/ha pour un rendement de 1 548,9 kg/ha.

À première vue, T6 affiche un nombre de fruits nettement supérieur (+99 999 fruits/ha) par rapport à T3, ce qui reflète un effet stimulant de l'ajout des engrais minéraux sur l'intensité de la fructification. Ce résultat est cohérent avec de nombreuses études qui démontrent que l'apport en azote et phosphore stimule la floraison et la nouaison chez le gombo (*Abelmoschus esculentus*) (Aiyelaagbe *et al.*, 2013 ; Olaniyi & Ajibola, 2008).

Cependant, malgré ce nombre accru de fruits, le rendement final (kg/ha) de T6 est légèrement inférieur à celui de T3 (1 548,9 kg vs. 1 692,2 kg), soit une différence négative de 143,3 kg/ha. Cela suggère que les fruits obtenus dans T6 étaient, en moyenne, plus petits ou moins denses que ceux produits dans T3.

Interprétation physiologique et agronomique:

- Ce phénomène peut s'expliquer par un effet de dilution des ressources : bien que l'engrais minéral ait permis une production accrue de fleurs/fruits, la quantité de biomasse végétale produite et la réserve assimilable par plante n'auraient pas été suffisantes pour alimenter tous les fruits jusqu'à pleine maturité. Ceci est un phénomène classique de compétition intra-plante, souvent observé en cas de floraison excessive non accompagnée d'une nutrition hydrique ou carbonée adéquate (Taiz *et al.*, 2017).
- De plus, le charbon activé seul (T3) pourrait avoir amélioré la rétention de l'humidité, la disponibilité lente et stable du potassium (issu de la fiente de volaille), et favorisé une meilleure activité microbienne, créant ainsi un micro-environnement plus équilibré pour la croissance racinaire et la maturation des fruits. Cela rejoint les conclusions de Lehmann & Joseph (2009), qui soulignent que le biochar co-composé agit comme un améliorateur de fertilité à libération progressive, réduisant les pertes par lixiviation.
- L'absence d'engrais minéraux dans T3 pourrait aussi avoir favorisé un meilleur équilibre physiologique entre croissance végétative et reproductive, contrairement à T6 où l'excès d'azote pourrait avoir orienté la plante vers une croissance végétative excessive au détriment de la qualité des fruits.

Conclusion comparative:

- Le traitement T6 maximise le nombre de fruits mais engendre un rendement pondéral inférieur à celui de T3. Cela signifie que T3 est plus efficient en termes de poids de fruit par unité de fruit produit.
- Si l'objectif de la production est d'obtenir un rendement commercial élevé en poids, T3 reste plus performant malgré l'absence d'engrais minéraux, ce qui en fait un choix pertinent en agriculture à faible intrant.
- À l'inverse, si la priorité est la production de graines ou d'un grand nombre de fruits (ex. semenciers, transformation artisanale), T6 pourrait être plus approprié.

Ces résultats soulignent la nécessité d'adapter les stratégies de fertilisation aux objectifs de production et aux contraintes économiques locales. Le charbon activé mûr à 15 jours apparaît comme une solution agroécologique prometteuse, particulièrement adaptée aux contextes de sols dégradés et à faible accès aux engrains chimiques.

Tableau 3. Evaluation des effets des traitements (T0 à T10) sur les paramètres de production du gombo

Traitements	Nombre de plantes récoltées à l'hectare	Nombre de fruits récolté à l'hectare	Rendement (Kg/hectare)
T0	23333±6666.70B	1077777±15556B	332.20±43.89C
T1	33333±3849.2A	138888±21199B	1050.00±163.43ABC
T2	40000±0.00A	250000±48228AB	1433.30±178.44AB
T3	40000±0.00A	276667±40552AB	1692.20±138.42A
T4	40000±0.00A	244444±29897AB	1415.50±233.12AB
T5	40000±0.00A	235555±9094.80AB	1411.10±138.20AB
T6	40000±0.00A	376666±46706A	1548.90±136.06AB
T7	40000±0.00A	223333±50148AB	1271.10±57.75AB
T8	40000±0.00A	184444±17462B	1035.60±174.60ABC
T9	40000±0.00A	212222±33628AB	1111.10±114.19ABC
T10	40000±0.00A	182222±40567B	892.20±161.05BC
P (5%)	0.0016	0.0023	0.00014

Lettres différentes indiquent des différences significatives au seuil de 5 % (Test de Tukey HSD).

3.2 Discussion

Les résultats obtenus montrent clairement que l'association du charbon de bois activé et des engrains minéraux influence positivement la croissance végétative et la productivité du gombo, en particulier dans un contexte pédoclimatique contraignant comme celui de Mbanza-Ngungu, où les sols sont acides et pauvres en éléments nutritifs.

Réponse végétative au charbon activé et aux engrais

Le diamètre au collet a montré une amélioration significative sous l'effet de certains traitements, notamment T2 (charbon seul) et T1 (engrais seuls), avec un effet maximal observé pour T2 (0.7333 cm). Cela corrobore les observations de Glaser *et al.* (2002), qui ont démontré que le biochar améliore la structure du sol, augmente la rétention en eau et stimule la croissance racinaire. De plus, le biochar activé par la fiente de volaille, riche en azote et phosphore, peut libérer progressivement des nutriments disponibles au système racinaire (Lehmann & Joseph, 2009).

L'absence de différence significative du taux de levée entre les traitements indique que les amendements n'ont pas influencé la germination directement. Cela est en accord avec Steiner *et al.* (2007), qui notent que le biochar agit surtout sur les phases post-levée via ses effets structuraux et chimiques sur le sol.

Amélioration de la productivité : un effet synergique

Tous les traitements ont induit une amélioration significative du rendement par rapport au témoin, ce qui confirme les bénéfices de la fertilisation sur des sols appauvris. Le rendement le plus élevé a été obtenu avec le traitement T3 (charbon de bois activé 15 jours seul), suivi de T6 (charbon 15 jours + engrais minéraux dose pleine). Cette performance remarquable du charbon seul (T3: 1692.2 kg/ha) dépasse même celle du traitement combiné T6 (1548.9 kg/ha), ce qui soulève plusieurs interprétations :

- Le charbon activé à 15 jours semble représenter une fenêtre optimale de stabilisation organique, comme le suggèrent Méndez *et al.* (2012). Une période de compostage de 15 jours permettrait une meilleure transformation des composés organiques volatils et une plus grande bioaccessibilité du phosphore.
- Le rendement supérieur de T3 malgré un nombre de fruits inférieur à T6 (276 667 vs. 376 666) suggère une meilleure répartition des ressources au sein de la plante, avec des fruits plus lourds ou mieux remplis. Cette hypothèse rejoue les travaux de Chan *et al.* (2007), qui notent que le biochar peut améliorer le remplissage des fruits par la stabilisation du potassium et une meilleure activité enzymatique du sol.

- T6, bien que performant en nombre de fruits, pourrait avoir souffert d'un effet de dilution des nutriments, phénomène déjà observé dans les cultures légumières sous fertilisation azotée excessive (Cébron *et al.*, 2005). Une production trop abondante de fruits peut engendrer une compétition interne, réduisant leur taille ou leur qualité commerciale.

Nos résultats sont en accord avec ceux de Oguntunde *et al.* (2004), qui ont observé une augmentation de 140 % du rendement de maïs au Nigéria avec du charbon de bois en sol ferrugineux. De même, Agegnehu *et al.* (2015) ont démontré que la combinaison biochar-compost-engrais minéraux augmente significativement la biomasse et le rendement de blé sur sols acides en Éthiopie. Chez le gombo, Olaniyi & Ajibola (2008) rapportent que l'apport combiné de compost et d'engrais NPK permet un doublement du rendement par rapport à une fertilisation minérale seule, ce qui corrobore nos données où les traitements combinés (T5–T10) ont largement surpassé le témoin et les engrains seuls (T1). En revanche, peu d'études montrent que le biochar seul, comme ici dans T3, peut être aussi performant ou supérieur à un système combiné. Ce résultat innovant ouvre la voie à des stratégies de fertilisation à bas coût, plus durables, en particulier en contexte paysan ou dans les zones rurales à faible accès aux intrants chimiques.

Implications agronomiques

L'efficacité du charbon de bois activé à 15 jours sans engrais minéraux suggère qu'une valorisation locale des résidus organiques (fiente de volaille, déchets de charbon) peut offrir une alternative agroécologique crédible aux intrants coûteux. Cela s'inscrit pleinement dans la dynamique de transition vers une agriculture durable et à faibles émissions. Par ailleurs, l'application à demi-dose (T8, T9, T10) a permis d'obtenir des rendements intermédiaires, confirmant qu'une réduction des intrants chimiques est possible sans perte drastique de rendement, à condition d'un apport organique complémentaire bien formulé.

4 Conclusion

Les résultats de cette étude ont démontré que l'application combinée de charbon de bois activé et d'engrais minéraux améliore significativement la croissance et le rendement du gombo sur un sol acide et pauvre de la région de Mbanza-Ngungu. Le charbon activé maturé pendant 15 jours a présenté les effets les plus bénéfiques, avec ou sans engrais minéraux, suggérant une interaction positive entre la stabilisation organique et la disponibilité des nutriments. Le traitement T3 (charbon de bois activé seul) a permis d'atteindre le rendement le plus élevé, surpassant même les combinaisons incluant des engrais chimiques. Ces résultats soulignent le potentiel du charbon de bois activé enrichi comme alternative agroécologique à faible coût pour améliorer durablement la fertilité des sols dégradés, et justifient la poursuite des recherches sur son optimisation dans des systèmes de culture à faibles intrants. Des études complémentaires sont nécessaires pour évaluer les effets à long terme du charbon de bois activé sur les propriétés physicochimiques et biologiques des sols, ainsi que son efficacité sur d'autres cultures et dans différents contextes pédoclimatiques. Des analyses technico-économiques permettront également d'apprécier sa faisabilité et son adoption par les producteurs dans une perspectives d'agricultures durable.

REFERENCES

- [1] Agegnehu G., Bass A.M., Nelson P.N. & Bird M.I., 2015. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Sci. Total Environ.*, 543, 295-306.
- [2] Agegnehu G., Nelson P.N. & Bird M.I., 2016. The effects of biochar, compost and their mixture and mineral fertilizer on yield and soil properties. *Agron. Sustain. Dev.*, 36(3), 1-14.
- [3] Aiyelaagbe I.O.O., Ogbonna M.C. & Ibeawuchi I.I., 2013. Response of okra (*Abelmoschus esculentus*) to NPK fertilizer rates and planting densities in South-Western Nigeria. *Afr. J. Biotechnol.*, 12(29), 4651-4657.
- [4] Bünenmann E.K., Bongiorno G., Bai Z. et al., 2018. Soil quality-A critical review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, 105-125.
- [5] Cébron A., Norini M.P., Beguiristain T. & Leyval C., 2005. Real-time PCR quantification of PAH-ring hydroxylating dioxygenase (PAH-RHD α) genes from Gram positive and Gram negative bacteria in soil and sediment samples. *J. Microbiol. Methods*, 62(2), 229-240.

- [6] Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A. & Joseph S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Aust. J. Soil Res.*, 45(8), 629-634.
- [7] Chintala R., Mollinedo J. & Gonzalez J.M., 2024. Biochar enrichment and mineral interactions in acidic soils: Review of recent advances and field applications. *J. Soil Water Conserv.*, 79(1), 27-36.
- [8] Glaser B., Lehmann J. & Zech W., 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review. *Biol. Fertil. Soils*, 35(4), 219-230.
- [9] Habiyaremye A., Masharabu T., Nshimba H. et al., 2011. Flore et végétation du Congo central. *Afr. J. Ecol.*, 49(2), 123-134.
- [10] Lal R., 2020. Soil organic matter content and crop yield. *J. Soil Water Conserv.*, 75(2), 27A-32A.
- [11] Méndez A., Gómez A., Paz-Ferreiro J. & Gascó G., 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, 89(11), 1354-1359.
- [12] Méndez A., Paz-Ferreiro J. & Gascó G., 2022. Biochar and compost-biochar blends as sustainable organic amendments: A review. *Agronomy*, 12(6), 1452.
- [13] Nartey E.G., Adjei M. & Darko A., 2023. Effect of biochar and NPK fertilizer on vegetable production and soil quality in Ghana. *Heliyon*, 9(5), e15467.
- [14] Njeru M., Mugwe J. & Wanjohi J., 2023. Comparative analysis of integrated soil fertility management options on maize performance in acid soils of Kenya. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 126, 349-362.
- [15] Oguntunde P.G., Fosu M., Ajayi A.E. & Giesen N.V.D., 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biol. Fertil. Soils*, 39(4), 295-299.
- [16] Olaniyi J.O. & Ajibola A.T., 2008. Effects of inorganic and organic fertilizer applications on the growth, fruit yield and quality of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *J. Agron.*, 7(3), 233-238.
- [17] Steiner C., Teixeira W.G., Lehmann J. et al., 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil*, 291(1), 275-290.
- [18] Vanlauwe B., Coyne D., Gockowski J. et al., 2017. Sustainable intensification and the African smallholder farmer. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 26-27, 49-56.
- [19] Wairiu M., Chan K.Y. & Downie A., 2024. Long-term effects of biochar application on vegetable cropping systems in the Pacific. *Soil Use Manag.*, 40(1), 112-123.
- [20] Ye J., Zhang J., Liu M. & Wang Y., 2020. Effects of biochar application on crop yields and greenhouse gas emissions in China: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.*, 721, 137759.
- [21] Lehmann J. & Joseph S., 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. London, UK: Earthscan.
- [22] Lehmann J. & Joseph S., 2015. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2e ed. London, UK: Routledge.
- [23] Palm C.A., Myers R.J.K. & Nandwa S.M., 2001. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In: *Replenishing Soil Fertility in Africa*. SSSA Special Publication No. 51, 193-218.
- [24] Sanchez P.A., 2019. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. 2e ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [25] Taiz L., Zeiger E., Møller I.M. & Murphy A., 2017. *Plant Physiology and Development*. 6e ed. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates.
- [26] Venables W.N. & Ripley B.D., 2002. *Modern Applied Statistics with S*. 4e ed. New York, NY, USA: Springer.
- [27] FAO, 2022. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 - Systems at breaking point*. Rome, Italy: FAO.
- [28] Jones A., Breuning-Madsen H., Brossard M. et al., 2021. *Soil Atlas of Africa*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [29] WRB, 2007. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Reports No. 103. Rome, Italy: FAO.
- [30] Alain M., 2011. *Monographie sur la cité de Mbanza-Ngungu*. Mémoire : Université Kongo (RDC).

- [31] R Core Team, 2024. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>