

Valorisation des résidus de pyrolyse comme amendement organique pour l'amélioration de la fertilité des sols

[Valorization of Pyrolysis Residues as Organic Amendments for Soil Fertility Improvement]

**RALAIBIA Boniface Erménégilde¹, RAKOTOSOLOFO Andrianarinoro Desiré¹, RINDRANIAINA Manovontsoa Daniel²,
RASOLOFONDRAINIBE Lafiarizaka Volana Helinirina Tiana³, and RABESIAKA Maholy Rivo¹**

¹Chimie, Université de Fianarantsoa, Faculté des sciences, Madagascar

²Chimie, Université de Fianarantsoa, Ecole doctorale Géochimie et Chimie Médicinale, Madagascar

³Mathématiques, Université de Fianarantsoa, Faculté des sciences, Madagascar

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Sustainable management of organic residues is a major challenge for modern agriculture. Pyrolysis appears as a promising technology to convert biomass into a stable carbon-rich material called biochar. The aim of this study was to evaluate the potential of pyrolysis residues from whole Malagasy zebu horns (*Bos indicus*) as an organic amendment to improve soil fertility. Pyrolysis, carried out at controlled temperatures (450–490 °C) in a handmade furnace, resulted in a mass yield of approximately 40 %. The residues showed a high ash content (66.19 %), low moisture (4.09 %), and notable concentrations of major nutrients: total nitrogen 3.59 g/100 g, phosphorus 3.34 g/100 g, and potassium 0.089 g/100 g. Incorporation of these residues into soil could enhance water retention, nutrient availability, and organic matter stability. This study highlights the agronomic and environmental value of valorizing pyrolysis residues within a circular economy approach.

KEYWORDS: Pyrolysis, biochar, soil fertility, organic amendment, residue valorization, sustainable agriculture.

RESUME: La gestion durable des résidus organiques constitue un enjeu majeur pour l'agriculture moderne. La pyrolyse apparaît comme une technologie prometteuse permettant de transformer la biomasse en un matériau carboné stable appelé biochar. L'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel des résidus de pyrolyse issus de cornes entières de zébu (*Bos indicus*) malgache comme amendement organique pour l'amélioration de la fertilité des sols. La pyrolyse, réalisée à température contrôlée (450–490 °C) dans un four artisanal, a conduit à un rendement massique d'environ 40 %. Les résidus obtenus présentaient une forte teneur en cendres (66,19 %), une faible humidité (4,09 %) et des concentrations notables en éléments nutritifs majeurs: azote total 3,59 g/100 g, phosphore 3,34 g/100 g et potassium 0,089 g/100 g. Leur incorporation dans le sol pourrait améliorer la capacité de rétention d'eau, la disponibilité des nutriments et la stabilité de la matière organique. Cette étude met en évidence l'intérêt agronomique et environnemental de la valorisation des résidus de pyrolyse dans une approche d'économie circulaire.

MOTS-CLEFS: Pyrolyse, biochar, fertilité du sol, amendement organique, valorisation des résidus, agriculture durable.

1 INTRODUCTION

La dégradation des sols agricoles constitue aujourd'hui un défi majeur pour la sécurité alimentaire et la durabilité des systèmes de production. L'usage intensif d'engrais minéraux, bien qu'efficace à court terme, entraîne à long terme une diminution de la matière organique, une altération des propriétés physiques et biologiques du sol ainsi qu'une pollution des ressources en eau par lixiviation des nutriments [1].

Dans ce contexte, la valorisation des résidus organiques par des procédés alternatifs représente une voie prometteuse. La pyrolyse est un procédé thermochimique réalisé en conditions limitées en oxygène permettant de convertir la biomasse en un matériau carboné stable appelé biochar, accompagné de fractions gazeuses et liquides [2]. Le biochar est reconnu pour sa capacité à améliorer la structure du sol, augmenter la capacité d'échange cationique, améliorer la rétention d'eau et limiter les pertes de nutriments [3].

De nombreuses études ont montré que l'application de biochar améliore la disponibilité des nutriments et favorise l'activité microbienne du sol, tout en contribuant à la séquestration du carbone [4,5]. Toutefois, la majorité des travaux portent sur des biochars issus de biomasses végétales. Les biomasses animales, telles que les os ou les cornes, riches en éléments minéraux, restent encore peu exploitées dans ce domaine.

Les cornes de zébu (*Bos indicus*), abondantes dans le contexte malgache, constituent une ressource potentielle intéressante pour la production de biochar minéral riche en phosphore, calcium et azote. Leur valorisation permettrait à la fois de réduire les déchets et d'améliorer la fertilité des sols agricoles.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer le potentiel des résidus de pyrolyse issus de cornes de zébu comme amendement organique à travers leur caractérisation physicochimique et la discussion de leur intérêt agronomique.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 MATIÈRE PREMIÈRE ET PROCÉDÉ DE PYROLYSE

La biomasse utilisée était constituée de cornes entières de zébu (*Bos indicus*) collectées localement. Après la collecte, les cornes ont été lavées à l'eau distillée afin d'éliminer les impuretés superficielles, puis séchées à l'air libre pendant plusieurs jours pour réduire leur teneur en eau initiale.

La pyrolyse a été réalisée dans un réacteur artisanal constitué d'un baril en acier inoxydable fermé hermétiquement afin de limiter l'apport d'oxygène et d'éviter la combustion de la biomasse. Le chauffage du réacteur était assuré par un feu de bois externe. La température au cœur du système était suivie à l'aide d'un thermocouple et maintenue dans un intervalle compris entre 450 et 490 °C, correspondant à un régime de pyrolyse lente.

La durée du traitement thermique était de 4 heures, permettant une carbonisation progressive des cornes. Après arrêt du chauffage, le dispositif a été laissé à refroidir naturellement à température ambiante. Le résidu solide obtenu a ensuite été récupéré, légèrement broyé, homogénéisé et conservé dans des récipients hermétiques en vue des analyses.

Afin d'illustrer le principe expérimental utilisé, un schéma simplifié du dispositif de pyrolyse est présenté à la Figure 1.

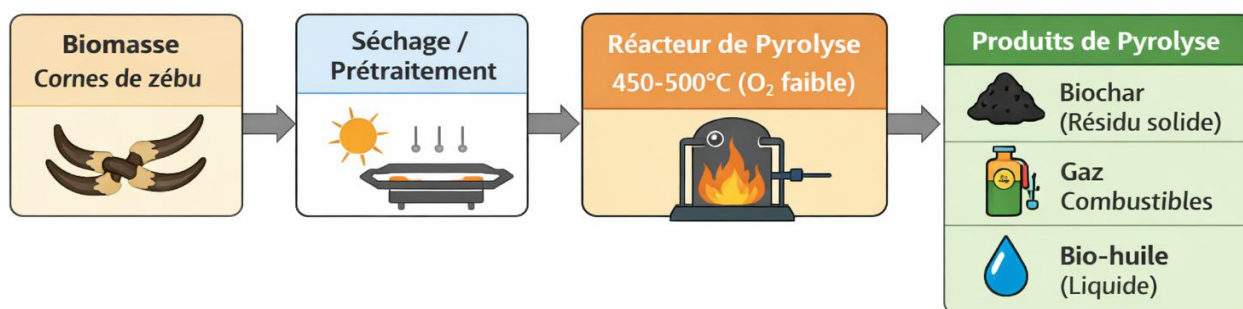


Fig. 1. Schéma simplifié du procédé de pyrolyse appliqué aux cornes de zébu pour la production de biochar

2.2 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION PHYSICOCHIMIQUE

Les résidus solides issus de la pyrolyse ont été caractérisés afin d'évaluer leur composition chimique et leur potentiel comme amendement organique.

La teneur en humidité a été déterminée par séchage gravimétrique à 103 °C jusqu'à masse constante. La teneur en cendres a été obtenue par calcination de l'échantillon dans un four à moufle à 550 °C pendant plusieurs heures.

L'azote total (NTK) a été dosé selon la méthode de Kjeldahl, comprenant les étapes de minéralisation, distillation et titrage. Le phosphore total a été déterminé après minéralisation acide par dosage spectrophotométrique. Le potassium a été mesuré sur la solution minéralisée par photométrie de flamme ou par spectrométrie d'absorption atomique.

3 RÉSULTATS

3.1 RENDEMENT DE PYROLYSE

La pyrolyse des cornes de zébu a conduit à l'obtention d'un résidu solide carbonisé. À partir de 20 kg de biomasse initiale, une masse finale de 8 kg de résidus a été récupérée, correspondant à un rendement massique d'environ 40 %.

Le résidu solide obtenu présentait une texture homogène et friable, de couleur noirâtre, caractéristique de la carbonisation. Pendant le processus, une partie de la biomasse a été transformée en composés volatils, qui se sont échappés sous forme de gaz et de condensats, tandis que le résidu restant représentait la fraction carbonée et minérale stable de la biomasse initiale.

3.2 PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES

Les analyses physicochimiques ont permis de caractériser le résidu de pyrolyse obtenu à partir des cornes de zébu. Les paramètres mesurés comprennent la teneur en cendres, l'humidité ainsi que les concentrations en éléments nutritifs majeurs (N, P et K). Afin de situer les valeurs analytiques obtenues, une comparaison avec des plages de référence agronomiques inspirées de la classification paramétrique de Riquier a été intégrée. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Paramètres physicochimiques du biochar issu des cornes de zébu et positionnement selon des plages de référence agronomiques [6]

Paramètre	Unité	Teneur K-248	Plage de référence*	Positionnement
Cendres	g/100g	66,19	> 40	Élevé
Humidité	g/100g	4,09	< 10	Faible
Azote (NTK)	g/100g	3,59	1 – 5	Moyen à élevé
Phosphore (P)	g/100g	3,34	1 – 4	Élevé
Potassium (K)	g/100g	0,089	0,05 – 0,3	Faible à moyen

*Plages indicatives inspirées de la classification paramétrique de Riquier pour l'évaluation agronomique des amendements.

Le Tableau 1 présente les valeurs analytiques du résidu de pyrolyse ainsi que leur positionnement par rapport à des plages de référence. La teneur en cendres atteint 66,19 g/100 g, tandis que l'humidité est limitée à 4,09 g/100 g. Les concentrations en azote, phosphore et potassium sont respectivement de 3,59, 3,34 et 0,089 g/100 g, permettant de situer le biochar dans une gamme faible à élevée selon les éléments considérés.

Afin de compléter cette caractérisation, une comparaison des teneurs en N, P et K du biochar avec un engrais chimique de type NPK est présentée à la Figure 2.

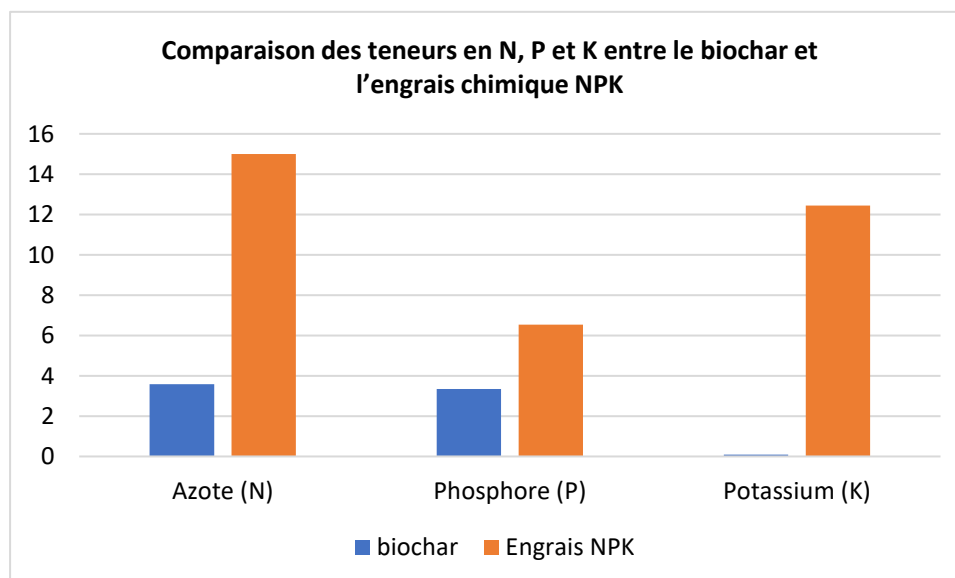


Fig. 2. Comparaison des teneurs en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) entre le biochar issu de la pyrolyse des cornes de zébu et l'engrais chimique NPK

La Figure 2 montre que l'engrais NPK présente des concentrations plus élevées en N, P et K que le biochar. Néanmoins, le biochar présente des teneurs mesurables pour chacun de ces éléments, traduisant son potentiel comme source complémentaire de nutriments. Cette comparaison permet de situer la valeur agronomique relative du résidu de pyrolyse par rapport à un fertilisant minéral classique.

4 DISCUSSIONS

Les résidus de pyrolyse issus des cornes de zébu présentent un profil physicochimique favorable à leur utilisation comme amendement organique. Le rendement massique d'environ 40 % est cohérent avec les valeurs rapportées pour des biomasses animales riches en minéraux, généralement plus élevées que celles des biomasses végétales lignocellulosiques (25–35 % selon la température et la durée de pyrolyse) [1]. Cette différence s'explique par la forte teneur en composés inorganiques tels que le calcium, le phosphore et le magnésium, caractéristiques des matrices osseuses et kératiniques [2].

La teneur élevée en cendres (66,19 %) confère au résidu un potentiel important pour la correction de l'acidité des sols et pour l'amélioration de la disponibilité des éléments nutritifs par effet tampon. Les biochars riches en cendres augmentent la capacité d'échange cationique et favorisent la libération progressive de nutriments, ce qui est particulièrement intéressant pour les sols tropicaux acides de Madagascar [2,7].

La concentration en azote total (3,59 g/100 g) est notable comparée aux biochars végétaux (<1 %), qui perdent l'azote sous forme volatilisée pendant la pyrolyse [3]. Cette teneur élevée résulte de la résistance thermique de la kératine contenue dans les cornes, limitant la dégradation des protéines. De plus, les biochars riches en azote favorisent la nutrition azotée des cultures et réduisent les pertes par lixiviation grâce à l'adsorption de l'ammonium sur les surfaces poreuses [4].

Le phosphore, présent à hauteur de 3,34 g/100 g, constitue un avantage majeur, car cet élément est souvent immobilisé dans les sols tropicaux par les oxydes de fer et d'aluminium [5]. L'application de biochar enrichi en P permet non seulement d'apporter cet élément, mais aussi d'améliorer le pH et la capacité d'échange cationique, favorisant une libération progressive et durable du phosphore [7].

Le potassium, bien que plus faible (0,089 g/100 g), demeure intéressant. Les biochars agissent comme des réservoirs capables de retenir le K et de le restituer progressivement aux racines, limitant ainsi les pertes par lessivage [8].

Au-delà de l'apport chimique, les propriétés physiques du biochar jouent un rôle déterminant. La structure poreuse améliore la rétention d'eau et l'aération, réduisant la densité apparente et favorisant l'enracinement des plantes, ce qui augmente la tolérance au stress hydrique [9].

La microstructure carbonée du biochar constitue également un support pour la microflore du sol. Les surfaces poreuses offrent des niches pour les microorganismes impliqués dans la minéralisation de la matière organique et le cycle des nutriments, stimulant l'activité microbienne et favorisant la symbiose racinaire [10].

Enfin, l'intérêt environnemental de ces résidus dépasse la seule fertilisation. La pyrolyse stabilise le carbone sous une forme résistante à la dégradation, participant à la séquestration du carbone et à l'atténuation du changement climatique [11]. La valorisation des cornes de zébu par pyrolyse permet ainsi une approche intégrée combinant gestion durable des déchets, amélioration des sols et contribution à la lutte contre le changement climatique.

Des essais agronomiques en conditions réelles restent toutefois nécessaires pour quantifier l'impact sur la productivité des cultures, la dynamique des nutriments et les interactions sol-plante.

5 CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer le potentiel des résidus de pyrolyse issus des cornes de zébu malgache comme amendement organique pour l'amélioration de la fertilité des sols. La pyrolyse a conduit à un rendement massique d'environ 40 %, produisant un résidu solide carbonisé riche en cendres (66,19 %) et en éléments nutritifs essentiels, notamment l'azote (3,59 %), le phosphore (3,34 %) et le potassium (0,089 %). Ces caractéristiques physicochimiques indiquent que ces résidus constituent une source stable et durable de nutriments, tout en contribuant à la rétention d'eau et à l'amélioration de la structure du sol.

L'incorporation de ces résidus pourrait soutenir l'activité microbienne et favoriser la libération progressive des nutriments, représentant ainsi une alternative complémentaire aux fertilisants chimiques classiques. Par ailleurs, la valorisation des cornes de zébu par pyrolyse contribue à la gestion durable des déchets animaux et à la séquestration du carbone, s'inscrivant dans une approche d'agriculture circulaire et durable.

Des études agronomiques complémentaires en conditions de terrain sont nécessaires pour confirmer l'effet de ces résidus sur la croissance des cultures, la productivité et les propriétés des sols à long terme. Néanmoins, ces résultats confirment le potentiel des cornes de zébu pyrolysées comme ressource organique valorisable et durable pour l'agriculture malgache.

REFERENCES

- [1] S. Tomczyk, Z. Sokołowska, P. Boguta, «Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects,» *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 19, pp. 191–215, 2020. DOI: 10.1007/s11157-020-09523-3.
- [2] J. M. Novak, B. L. Busscher, K. Chief, et al., «Biochars impact on soil-moisture storage in an Ultisol and two Aridisols,» *Soil Science*, vol. 184, pp. 1–10, 2019. DOI: 10.1097/SS.0000000000000267.
- [3] L. Zhang, Q. Cai, et al., «Biochar application on soil nitrogen: a meta-analysis,» *Global Change Biology Bioenergy*, vol. 13, pp. 1–12, 2021. DOI: 10.1111/gcbb.12898.
- [4] Z. Wang, Z. Wang, Y. Luo, Y. Zhan, Y. Meng, Z. Zhou, «Biochar increases ¹⁵N fertilizer retention and indigenous soil N uptake in a cotton-barley rotation system,» *Geoderma*, vol. 357, Art. 113944, 2020. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113944.
- [5] D. A. Laird, P. Fleming, D. D. Davis, R. Horton, B. Wang, D. L. Karlen, «Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil,» *Geoderma*, vol. 158, pp. 443–449, 2010. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.05.013
- [6] J. Riquier, L. D. Brameo, J. P. Cornet, A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity (first approximation), *Soil Resources, Development and Conservation Service, Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1970, 38 p.*
- [7] H. Schulz, B. Glaser, «Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth,» *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012. DOI: 10.1002/jpln.201100143.
- [8] Y. Ding, J. Zhang, et al., «Biochar to improve soil fertility. A review,» *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 36, 36, 2016. DOI: 10.1007/s13593-016-0372-z.
- [9] H. Blanco-Canqui, «Biochar and soil physical properties,» *Soil Science Society of America Journal*, vol. 81, pp. 687–711, 2017. DOI: 10.2136/sssaj2017.01.0017.
- [10] J. Lehmann, D. C. Rillig, et al., «Biochar effects on soil biota,» *Soil Biology & Biochemistry*, vol. 43, pp. 1812–1836, 2011. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022
- [11] D. Woolf, J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, S. Joseph, «Sustainable biochar to mitigate global climate change,» *Nature Communications*, vol. 1, Art. 56, 2010. DOI: 10.1038/ncomms1053.