

## Caractérisation chimique d'un biocharbon de balles de riz destiné à l'amendement des sols au Burkina Faso

Désiré Jean Pascal LOMPO<sup>1,4\*</sup>, Lambiénou YE<sup>1,4</sup>, Souleymane OUEDRAOGO<sup>2</sup>, Siélé Ibrahim SORI<sup>3</sup> et Hassan Bismarck NACRO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Dédougou (UDDG), Institut des Sciences de l'Environnement et du Développement Rural (ISEDR), BP 176, Dédougou, Burkina Faso

<sup>2</sup> Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Laboratoire Sol-Eau-Plante, Station de Farako-Bâ, 01 BP 910 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

<sup>3</sup> Bureau National des Sols (BUNASOLS), Laboratoire Sol-Eau-Plante, Ouagadougou, Burkina Faso, 03 BP 7005 Ouagadougou 03, Burkina Faso

<sup>4</sup> Université Nazi Boni (UNB), Institut du Développement Rural (IDR), Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du Sol (LERF), BP 1091 Bobo Dioulasso, Burkina Faso

\* Correspondance, courriel : [lompodésire@yahoo.fr](mailto:lompodésire@yahoo.fr)

### Résumé

Le biocharbon est du charbon obtenu par la pyrolyse de biomasses végétales. Cette étude a pour objectif principal la caractérisation chimique du biocharbon de balles de riz produit à l'aide d'un four local confectionné à partir d'un fus de 200 litres. Les caractéristiques chimiques du biocharbon sont déterminées à l'aide des méthodes d'analyses usuelles utilisées pour les amendements organiques. Les résultats montrent que le biocharbon produit à partir des balles de riz a une teneur moyenne en carbone organique (Corg) de 35 % avec un rapport C/N égal à 68. Le pH<sub>eau</sub> du biocharbon de balles de riz est alcalin (7,8). Par ailleurs, ce biocharbon renferme des teneurs en nutriments relativement faibles mais conformes aux normes internationales recommandées pour les biocharbons. Cette étude montre que le biocharbon de balles de riz peut être utilisé pour corriger l'acidité du sol et pour une gestion durable de la fertilité des sols en l'occurrence dans les pays sahéliens.

**Mots-clés :** *fertilité des sols, amendement organique, biocharbon, balles de riz, pyrolyse, Burkina Faso.*

### Abstract

#### Chemical characterization of rice husks derived biochar for soil amendment in Burkina Faso

Biochar is a coal obtained from the pyrolysis of biomass. It is used as soil amendment to increase crop production while sequestering carbon into the soil. Biochar characteristics vary according to the biomass type and the pyrolysis conditions. This study focuses on the chemical characterization of rice husk biochar produced using a local oven made from a 200-litre drum. The rice husk derived-biochar in this study have an average Corg content of 35 % with a C/N ratio of 67, indicating that its use as soil amendment must be combined with mineral fertilizers to ensure good plant development and crop yields. The pH of the rice husk biochar is alkaline. Therefore, it appears suitable for correcting the pH of acidic soils. Furthermore, this biochar contains relatively low nutrient contents but complies with the international standards recommended for biochar. This study shows that rice husk biochar can be used for sustainable soil fertility management in Sahelian countries.

**Keywords :** *soil fertility, organic amendment, biochar, rice husks, pyrolysis, Burkina Faso.*

## 1. Introduction

De nos jours, partout dans le monde et particulièrement en Afrique, on assiste à une dégradation accélérée des terres agricoles. Cela est dû aux effets combinés des activités agricoles et du changement climatique [1, 2]. Plus de la moitié de la superficie des terres agricoles du continent africain est affectée par le phénomène de dégradation, impactant ainsi négativement les rendements des cultures [3, 4]. Dans les pays de l'Afrique Subsaharienne en l'occurrence au Burkina Faso, les sols sont en majorité naturellement pauvres et se dégradent continuellement [5]. Pour assurer les besoins alimentaires grandissants d'une population toujours croissante, plusieurs techniques de gestion durable de la fertilité des sols ont été adoptées dans les différentes régions du monde. Parmi ces techniques, nous avons l'utilisation de la fumure organique en combinaison avec la fumure minérale et plus récemment l'utilisation du biocharbon découvert en Amazonie. En effet, la découverte en Amazonie de terres agricoles noires très fertiles, appelées *Terra preta do indio* (terre noire des indiens en portugais) qui donnent des rendements supérieurs à 200 % relativement aux oxisols typiques de ces régions [6], a été le précurseur d'une série d'investigations scientifiques depuis le 19<sup>ème</sup> siècle. Il ressort que l'ingrédient majeur de cette fertilité du sol est le carbone. Le carbone organique du sol est responsable d'une grande part de la fertilité des sols [7]. De ce fait, le biocharbon est de plus en plus envisagé comme amendement des sols. C'est un type de charbon issu de la pyrolyse de biomasses animale ou végétale [8]. Il possède des propriétés très remarquables tant sur le plan agronomique qu'environnemental. Il contribue à séquestrer le carbone dans le sol, à améliorer les propriétés du sol et à réduire les émissions des gaz à effet de serre [9 - 12].

Le Biocharbon incorporé au sol, persiste plus longtemps et adsorbe mieux les cations que d'autres types d'amendements organiques [9, 13]. L'utilisation du Biocharbon comme amendement améliore la fertilité des sols et partant, les rendements des cultures [14, 15]. Cependant, la quantité et la qualité du biocharbon dépend de plusieurs facteurs dont le type de matière première utilisé [16, 17]. En effet, les biocharbons ont des caractéristiques qui varient beaucoup plus avec le type de biomasse utilisé pour la production et ils ont par conséquent des effets différents sur les propriétés du sol [18]. De plus la communauté scientifique n'est pas unanime au sujet des effets bénéfiques du biocharbon sur les rendements des cultures et l'environnement. Ainsi, avant d'en proposer l'utilisation comme amendement, des études préliminaires sont nécessaires pour évaluer les caractéristiques chimiques des différents biocharbons produits à partir de différents résidus de récoltes. Au Burkina Faso les travaux de recherches scientifiques sur la caractérisation chimique des biocharbons en vue de leurs utilisations pour améliorer la qualité des sols qui sont en général acides, pauvres en matière organiques et en nutriments, sont presque inexistantes. Pourtant d'énormes quantités de résidus culturaux sont disponibles mais elles sont peu ou pas judicieusement exploitées. C'est dans ce contexte que des investigations sur la production et l'utilisation de biocharbons à partir de différents types de résidus culturaux disponibles dans les différentes zones agroécologiques du Burkina Faso sont initiées. La présente étude s'inscrit dans ce cadre et a pour objectif principal la détermination des caractéristiques chimiques du biocharbon de balles de riz destiné à l'amendement des sols au Burkina Faso. Il s'agit spécifiquement de l'évaluation du taux de carbone organique, du pH<sub>eau</sub> et des teneurs de quelques éléments nutritifs dans le biocharbon de balles de riz.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Site d'étude

L'étude a été conduite dans la station de recherche de l'INERA (Farako-Bâ) située à une dizaine de kilomètres au sud de Bobo-Dioulasso, sur l'axe routier Bobo Dioulasso-Banfara. La station de recherche de l'INERA-Farako-Bâ est localisée entre 04° 20' de longitude Ouest et 11° 06' de latitude Nord. Les sols sont faiblement ferrallitiques à texture variant de sablo-limoneuse en surface à argilo-sableuse en profondeur. On trouve au niveau de cette station de recherches agricoles trois classes de sols que sont : la classe des sols peu évolués, la classe des sols à sesquioxides de fer et de manganèse et la classe des sols ferrallitiques [19].

### 2-2. Production du Biocharbon

Les balles de riz ont été utilisées pour la production du biocharbon. Elles font partie des types de résidus de cultures jusqu'à présent très peu ou pas utilisés comme source d'énergie ou pour l'alimentation des animaux. Le type de four utilisé est de type artisanal confectionné à partir d'un fus (barrique) de 200 litres [20]. Il permet de réaliser une pyrolyse incandescente ou pyrolyse à flamme avec un faible apport d'oxygène. La flamme obtenue lors de la pyrolyse est une flamme propre sans fumée issue de la production de gaz pyrolytiques [20].

### 2-3. Les paramètres chimiques mesurés

Le biocharbon a été broyé après séchage et conservé dans un sac. Des échantillons ont été prélevés à différents endroits du sac afin de constituer un échantillon composite pour des analyses au laboratoire. Les paramètres chimiques du biocharbon qui ont été évalués sont le pH<sub>eau</sub> et les teneurs en oligo-éléments (Cu, Fe et Zn), en matière organique, en carbone organique, en azote total, en phosphore total et en potassium total. Les teneurs en oligo-éléments (Cu, Fe et Zn), le taux de matière organique (MO) et de C<sub>org</sub> ont été déterminés après calcination de l'échantillon à 650°C [21]. La teneur en azote total (N total) a été déterminée par la méthode de KJELDAHL [22]. Après une minéralisation par l'acide sulfurique salsalique, les dosages du P et du K ont été effectués respectivement par un auto-analyseur et un photomètre à flamme. Le pH<sub>eau</sub> a été déterminé au pH-mètre à électrode de verre suivant un rapport biocharbon/solution de 1/2,5 [22].

## 3. Résultats et discussion

### 3-1. Valeurs du carbone organique, de la matière organique, du rapport C/N et du pH du biocharbon des balles de riz

Le biocharbon de balles de riz contient une teneur en carbone organique (C<sub>org</sub>) de 35 % (*Tableau 1*). Les valeurs du C<sub>org</sub> des biocharbons varient généralement entre 35 % et 95 % en fonction du type de biomasse. Les teneurs en C<sub>org</sub> sont comprises entre 40 et 50 % pour les résidus culturaux contre 70 à 90 % pour les biocharbons de bois et des coques ou écorces [23, 24]. Le C<sub>org</sub> des biocharbons qui est un bon indicateur de la teneur en carbone (C) des biocharbons, est la fraction de C qui est difficile à minéraliser par les microorganismes du sol et c'est ce qui permet aux biocharbons de contribuer significativement au stockage du carbone dans le sol [25, 26]. Cela confère ainsi aux biocharbons leurs aptitudes à réduire les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère [26], à améliorer l'agrégation du sol, la rétention en du sol, la disponibilité des nutriments et les rendements des cultures [27]. C'est ce qui justifie l'attention que la communauté scientifique accorde aux biocharbons. L'utilisation de ce biocharbon comme amendement

améliorerait le statut organique des sols pauvres en matière organique du Burkina Faso, et partant leur capacité de rétention en eau et la disponibilité des nutriments pour les plantes [27, 28]. Le rapport C/N du Biocharbon de balles de riz est de 67,6 (*Tableau 1*). Cette valeur est élevée mais reste inférieure à celles rencontrées dans la littérature [23]. Les valeurs élevées du rapport C/N des biocharbons pourraient compromettre la croissance et le développement des plantes cultivées. En effet, le rapport C/N élevé d'un biocharbon pourrait entraîner une immobilisation de l'azote du sol [29] et par conséquent, empêcher un bon développement des plantes si l'utilisation de ce biocharbon n'est pas combinée à un engrais azoté. Le biocharbon de balles de riz a présenté un pH de 7,8 (*Tableau 1*). Les biocharbons sont en général basiques [17, 30]. Les pH basiques des biocharbons s'expliquent par leurs teneurs élevées en cendres qui les enrichissent en composés tels que le  $\text{KHCO}_3$  et le  $\text{CaCO}_3$  qui ont des capacités alcalinisant importantes [31]. Les carbonates constituent effectivement les principaux composés alcalinisant des biocharbons [32]. Les valeurs élevées de pH du biocharbon de balles de riz lui confèrent l'aptitude d'être utilisé pour le chaulage des sols acides [33]. La plupart des sols du Burkina Faso étant acides le biocharbon des balles de riz est donc adapté pour relever leur niveau de pH. Ces différents résultats obtenus sur le Corg et le pH du biocharbon à base de balles suggèrent des perspectives intéressantes aussi bien pour la communauté scientifique que pour les exploitants agricoles dans les pays surtout sahéliens où les sols sont en général pauvres en matière organique avec des pH acides associés à des toxicités ferrique et aluminique. Le biocharbon de balles de riz est utilisable comme amendement en vue d'améliorer le statut organique et le pH de ces sols pauvres et acides [27]. Si l'usage de ce biocharbon est associé à des apports adéquats d'engrais minéraux cela boosterait la production agricole de façon durable au même titre que des biofertilisants qui ont induit des effets bénéfiques sur le sol et les rendements de l'oignon [34].

**Tableau 1 :** Carbone total (Corg), matière organique (MO) et pH du Biocharbon de balles de riz. Chaque valeur correspond à la moyenne ( $n = 5$ ) suivie de l'erreur standard

Paramètre chimique	Teneurs dans le Biocharbon de balles de riz
Corg (%)	34,52 ± 0,48
MO (%)	59,49 ± 0,93
C/N	67,6 ± 5,15
pH	7,8 ± 0,08

### 3-2. Teneurs en éléments nutritifs majeurs et secondaires du Biocharbon de balles de riz

Les teneurs en éléments nutritifs majeurs varient en fonction de l'élément. La teneur en azote total (Ntotal), en phosphore total (Ptotal) et en potassium total (Ktotal) du biocharbon produits sont de 0,51 %, 0,52 % et 2,18  $\text{mg.kg}^{-1}$  respectivement (*Tableau 2*). Ces valeurs sont relativement faibles. Ceci est conforme aux résultats de certaines études [35] qui ont également montré que les biocharbons obtenus à partir des résidus de cultures sont pauvres en éléments nutritifs pour les plantes. Par ailleurs, les teneurs en nutriments varient aussi en fonction de la température [36, 37] et du type de biomasse [36]. En effet, plus la température de pyrolyse augmente, plus les teneurs en nutriments des biocharbons augmentent [36]. Cependant, les températures de pyrolyse supérieures à 700°C peuvent entraîner des pertes de P et K des biocharbons [38]. De ce qui précède et au regard des faibles teneurs surtout en P et K observé au cours de la présente étude, la température de pyrolyse est comprise entre 300 et 700°C [38, 41]. Les teneurs en P et K obtenues sont cependant inférieures à celles du biocharbon de rachis de maïs produit avec le même type de réacteur local en forme de cône [42]. Les teneurs en éléments nutritifs secondaires (Ca et Mg) sont de 3,94  $\text{g.kg}^{-1}$  et 1,04  $\text{g.kg}^{-1}$  respectivement pour le Ca et le Mg (*Tableau 2*). Les teneurs en éléments secondaires varient énormément et peuvent atteindre jusqu'à 1/3 de la masse total du biocharbon [24].

**Tableau 2 :** *Teneur en éléments nutritifs majeurs et secondaires du biocharbon de balles de riz. Chaque valeur correspond à la moyenne (n = 5) suivie de l'erreur standard*

Éléments nutritifs	Teneur du biocharbon de balles de riz
N total (%)	0,51 ± 0,03
P total (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,52 ± 0,07
K total (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,18 ± 0,09
Ca (g.kg <sup>-1</sup> )	3,94 ± 0,21
Mg (g.kg <sup>-1</sup> )	1,04 ± 0,07

### 3-3. Teneurs en oligo-éléments du Biocharbon de balles de riz

Les résultats révèlent la présence d'oligo-éléments (Cu, Fe et Zn) dans le biocharbon de balles de riz avec des teneurs qui varient en fonction de l'oligo-élément. Les teneurs du Cu, du Fe et du Zn dans le biocharbon produit localement à l'aide d'un modèle de four en forme de cône sont respectivement égales à 7,73 mgkg<sup>-1</sup>, 5,8 mgkg<sup>-1</sup> et 37,51 mgkg<sup>-1</sup> (**Tableau 3**). Ces résultats sont comparables à ceux de plusieurs auteurs qui ont également montré que les biocharbons contiennent des oligo-éléments avec des teneurs variables en fonction des types de biomasses et de l'oligo-élément [43 - 45]. En effet, les teneurs varient de 0,04 à 19,15 mgkg<sup>-1</sup> pour le Cu [43, 44], de 0 à 106, 9 mgkg<sup>-1</sup> pour le fer [45] et de 4,91 à 173,50 mgkg<sup>-1</sup> pour le Zn [44]. Les concentrations en C et Zn biocharbon varient également en fonction de la température de pyrolyse [46]. Par ailleurs, les teneurs en Cu, Fe et Zn obtenus avec le biocharbon de balles de riz dans cette étude respectent les normes internationales recommandées pour les biocharbons [24]. Cela signifie que, sur le plan environnemental, le Cu, le Fe et le Zn ne peuvent donc pas causer des restrictions d'application de ce biochar. De ce fait, le biocharbon de balle de riz constituerait une source importante de Cu, Fe et Zn à valoriser afin d'améliorer les teneurs de ces éléments dans les sols agricoles.

**Tableau 3 :** *Teneur en oligo-éléments du biocharbon de balles de riz. Chaque valeur correspond à la moyenne (n = 5) suivie de l'erreur standard*

Oligo-éléments	Teneur du biocharbon de balles de riz (mg.kg <sup>-1</sup> )
Cu	7,73 ± 0,11
Fe	5,80 ± 0,23
Zn	37,51 ± 0,23

## 4. Conclusion

La présente étude a permis de caractériser chimiquement un biocharbon obtenu à partir de la pyrolyse de balles de riz. Ce biocharbon renferme de faibles teneurs en éléments nutritifs. Cependant, sa teneur en carbone organique et son rapport C/N sont assez élevés. Les caractéristiques chimiques du biocharbon obtenu respectent les valeurs standards internationales. De ce fait, le biocharbon de balles de riz est utilisable comme amendement mais en y ajoutant des engrais minéraux pour garantir une plus grande efficacité pour l'amélioration durable du statut organique des sols et une augmentation de la production agricole au Burkina Faso. Son pH alcalin lui confère la capacité de relever le pH des sols acides notamment ceux des pays sahéliens dont les pH sont généralement acides (4,2 < pH < 5,0) et peu acides (5,0 < pH < 6,5). Dans un contexte de changement climatique combiné à la faible fertilité des sols et des rendements agricoles, la production et l'utilisation du Biocharbon constituent donc une alternative intéressante pour une meilleure valorisation des résidus de cultures. Les futures investigations devront s'intéresser à la caractérisation des biocharbons issus d'autres types de résidus de culture et à la détermination de doses adéquates des biocharbons pour différents types de sols. Aussi, il est important que des investigations soient faites sur la faisabilité et les implications socio-économiques de la production et de l'utilisation des biocharbons à base des résidus culturaux au Burkina Faso.

## Références

- [1] - C. NYAMEKYE, M. THIEL, S. SCHÖNBRODT-STITT, B. J.-B. ZOUNGRANA and L. K. AMEKUDZI, *Sustainability*, 10, (2018) 3182, Doi:10.3390/su10093182
- [2] - International Fund for Agricultural Development (IFAD), Creating opportunity for rural youth, Rural Development Report, Rome, Italy. Rapport, (2019)
- [3] - Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), Peuplement, marché et sécurité alimentaire, cahiers de l'Afrique de l'ouest, ed. de l'OCDE, Livre, (2013)
- [4] - United Nations Environment Program (UNEP), *The economics of Land Degradation in Africa : Benefits of Action outweigh the cost*, Nairobi, Ecosystem Services Economics Units, UNEP Division of Environmental Policy Implementation, rapport, (2015)
- [5] - S. ZINGORE, J. MUTEGI, B. AGESA, L. TAMENE and J. KIHARA, *Better Crops with Plant Food*, 99 (1) (2015) 24 - 26, <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/68702>
- [6] - A. CROSS et S. P. SOHI, *Soil Biology and Biochemistry*, 43 (2011) 2127 - 2134
- [7] - J. L. YOST, A. E. HARTEMINK, Soil organic carbon in sandy soils: A review, In: *Advances in Agronomy*, Livre, (2019)
- [8] - D. MATOVIC, *Energy*, 36 (2011) 2011 - 2016
- [9] - D. WANG, P. JIANG, H. ZHANG, W. YUAND, *Science of the Total Environment*, 723 (2020) 137775, [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137775)
- [10] - D. A. LAIRD, P. FLEMING, D. D. DAVIS, R. HORTON, B. WANG et D. L. KARLEN, *Geoderma*, 158 (2010) 443 - 449 p.
- [11] - Q. WAN, J. H. YUAN, R. K. XU, X. H. LI, *Environ Sci. Pollut. Res. Int.*, 21 (2014) 2486 - 2495, <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2183-y>
- [12] - C. NAISSE, « Potentiel de séquestration de carbone de biochars et hydrochars, et impact après plusieurs siècles sur le fonctionnement du sol », Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Thèse de Doctorat, (2015)
- [13] - A. O. ADEKIYA, A. F. OLANIRAN, T. T. ADENUSI, C. AREMU, W. S. EJUE, Y. M. IRANLOYE, A. GBADAMOSI & A. OLAYANJU, *Sci. Rep.*, 10, 21021 (2020), <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78194-5>
- [14] - A. O. ADEKIYA, T. M. AGBEDE, C. M. ABOYEJI, O. DUNSIN & V. T. SIMEON, *Sci. Hortic.*, 243 (2019) 457 - 546
- [15] - G. AGEGNEHU, M. I. BIRD, P. N. NELSON and A. M. BASS, *Soil Research*, 53, N° 1 (2015) 1 - 12
- [16] - B. SINGH, B. P. SINGH et A. L. COWIE, *Australian Journal of Soil Research*, 48 (2010) 516 - 525, <https://doi.org/10.1071/SR10058>
- [17] - W. X. WU, M. YANG, Q. B. FENG, K. MCGROUTHER, H. L. WANG et H. H. LU, *Biomass Bioenergy*, 47 (2012) 268 - 276
- [18] - S. SCHIMMELPFENNIG et B. GLASER, *Journal of environment. Quality*, 41 (2012) 1001 - 1013, <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146>
- [19] - L. ZERBO, N. KONE, P. MORANT et L. THIOMBIANO, Caractérisation des sols des stations de recherches agricoles de l'INERA : Kambouinsé. Farako-ba, Saria, Niangoloko, Rapport, (1995) 109 p.
- [20] - P. S. ANDERSON, Affordable Biochar Production Options Small Cookstoves, Medium Barrels, and Some Large Devices. Presentation to First Midwest Biochar Conference, 14 June 2013, Champaign, IL., (2013) 50 p., <http://www.biochar.illinois.edu>
- [21] - D. F. BELL, *Journal of Soil Science*, 15 (1964) 84 - 92 p., <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1964.tb00247.x>
- [22] - BUREAU NATIONAL DE SOLS (BUNASOLS), Méthode d'analyse physique et chimique des sols, eaux et plantes. Burkina Faso, Document technique, N°3 (1987) 286 p.
- [23] - J. S. CHA, S. H. PARK, S. C. JUNG, C. RYU, J. K. JEON, M. C. SHIN, Y. K. PARK, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40 (2016) 1 - 15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- [24] - EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE (EBC), EBC Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.' European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland, Rapport, (2020), DOI:10.13140/RG.2.1.4658.7043

- [25] - G. XU, Y. LV, J. SUN, H. SHAO, L. WEI, Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications. *Clean-Soil Air Water*, 40 (2012) 1093 - 1098. DOI:10.1002/clen.201100738
- [26] - F. N. D. MUKOME and S. J. PARIKH, Chemical, Physical, and Surface Characterization of Biochar. In: *Biochar : Production, Characterization, and Applications*, edited by Yong Sik Ok, Sophie M. Uchimiya, Scott X. Chang, Nanthi Bolan; International Standard Book Number-13: 978-1-4822-4230-0, Livre, (2016)
- [27] - N. R. PANDIT, J. MULDER, S. E. HALE, V. MARTINSEN, H. P. SCHMIDT, G. CORNELISSEN, *Science of the Total Environment*, 625 (2018) 1380 - 1389
- [28] - D. ZHANG, G. PAN, G. WU, G. W. KIBUE, L. LI, X. ZHANG, J. ZHENG, J. ZHENG, K. CHENG, S. JOSEPH, X. LIU, *Chemosphere*, 142 (2016) 106 - 113
- [29] - B. M. D. KANOOU, Production et utilisation du biochar pour l'amendement des sols rouges lessivés tropicaux. Université de Laval, Québec, Canada, Thèse de Doctorat, (2017), <http://hdl.handle.net/20.500.11794/28120>
- [30] - M. LAGHARI, R. NAIDU, B. XIAO, Z. HU, M. SAFFAR, M. HU, M. N. KANDHRO, Z. CHEN, D. GUO, Q. JOGI, Z. N. ABUDI, et S. FAZAL, *Journal of Science, Food and Agriculture*, 96 (2016) 4840 - 4849, <https://doi.org/10.1002/jsfa.7753>
- [31] - R. R. DOMINGUES, P. F. TRUGILHO, C. A. SILVA, I. C. N. A. D. MELO, L. C. A. MELO, Z. M. MAGRIOTIS et M. A. SANCHEZ-MONEDERO, *PLoS ONE*, 12 (5) (2017), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884>
- [32] - J. H. YUAN, R. K. XU et H. ZHANG, *Bioresour. Technol.*, 102 (2011) 3488, DOI: 10.1016/j.biortech.2010.11.018
- [33] - E. FRIMPONG MANSO, E. K. NARTEY, T. A. ADJADEH, D. A. DARKO, I. Y. D. LAWSON and C. A. AMOATEY, *West African Journal of Applied Ecology*, 27 (2) (2019) 32 - 50
- [34] - J. SAWADOGO, P. J. D. A. COULIBALY, F. J. BAMBARA, A. C. SAVADOGO, E. COMPAORE et J. B. LEGMA, *Afrique Science*, 17 (6) (2020) 44 - 57
- [35] - P. G. SLAVICH, K. SINCLAIR, S. G. MORRIS, S. W. L. KIMBER, A. DOWNIE et L. VAN ZWIETEN, *Plant Soil*, 366 (2013) 213 - 227, DOI: 10.1007/s11104-012-1412-3
- [36] - J. H. YUAN, XU, R. K. W. QIAN et R. H. WANG, *J. Soils Sediments*, 11 (2011b) 741 - 750. DOI: 10.1007/s11368-011-0365-0
- [37] - M. I. AL-WABEL, A. AL-OMRAN, A. H. EL-NAGGAR, M. NADEEM et A. R. USMAN, *Bioresour. Technol.*, 131 (2013) 374 - 379, DOI: 10.1016/j.biortech.2012.12.165
- [38] - M. LAGHARI, Z. HU, M. S. MIRJAT, B. XIAO, A. A. TAGAR et M. HU, *J. Sci. Food Agric.*, 96 (2015) 199 - 206
- [39] - N. A. QAMBRANI, M. D. M. RAHMANA, S. WONC, S. SHIMA et C. RA, *Renewable and sustainable energy reviews*, 79 (2017) 255 - 273, DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.057
- [40] - E. K. AKOTO-DANSO, D. MANKA'ABUSI, C. STEINER, S. WERNER, V. HAERING, D. J. P. LOMPO, G. NYARKO, B. MARSCHNER, P. DRECHSEL et A. BUERKERT, *Journal of plant nutrition and soil science*, (2019) 1 - 15, DOI: 10.1002/jpln.201800339
- [41] - D. MANKA'ABUSI, C. STEINER, E. K. AKOTO-DANSO, D. J. P. LOMPO, V. HAERING, S. WERNER, B. MARSCHNER, et A. BUERKERT, *Nutrient cycling in agroecosystems*, 115 (2019) 263 - 279, [doi.org/10.1007/s10705-019-09969-0](https://doi.org/10.1007/s10705-019-09969-0)
- [42] - D. J. P. LOMPO, A. BALBONE, L. YÉ et H. B. NACRO, *Science et technique, Sciences naturelles et appliquées*, Spéciale hors-série, N° 5 (2020) 387 - 398
- [43] - A. FREDDO, C. CAI et B. REID, *Environ. Pollut.*, 171 (2012) 18 - 24, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.009>
- [44] - C. S. ZHANG, L. LIU, M. H. ZHAO, H. W. RONG et Y. XU, *Environ Sci. Pollut. Res.*, 25 (22) (2018) 21525 - 21534
- [45] - I. LOPEZ-CANO, M. LUZ CAYUELA, M. SANCHEZ-GARCIA et M. A. SANCHEZ - MONEDERO, *Sustainability*, 10 (2018) 2077, doi:10.3390/su10062077
- [46] - A. MENDEZ, M. TERRADILLOS et G. GASCÓ, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 102 (2013) 124 - 130