

Effet du biochar et de la poudre des balles de riz sur la productivité du maïs (*zea mays*) et les sols au Nord Cameroun

**Ahmadou Yerima Yaya Alim⁽¹⁾, Simon Djakba Basga⁽¹⁾
et Jean Pierre Nguetnkam⁽²⁾**

ahmadou.yerima@yahoo.fr

1 : Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD), BP 415, Garoua
Cameroun

2 : Université de Ngaoundéré, Faculté des Sciences, BP 454, Ngaoundéré
Cameroun

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de l'application du biochar et de la poudre des balles de riz combiné à l'engrais minéral sur le rendement de la variété CMS-9015 du maïs (*Zea mays*) et la fertilité des sols. L'expérience en champ avec trois répétitions couvrait 18 parcelles de 2,5 m × 2 m chacune disposées suivant un plan en blocs aléatoires randomisés. Le traitement de base dans toutes les parcelles exceptée le témoin nul T0 (sans engrais, ni amendement) était l'engrais NPK + Urée (N) en dose complète et demi-dose : (T1) : 100 kg NPK ha⁻¹ + 50 kg N ha⁻¹ (traitement recommandé) ; T2 = 15 t (biochar) ha⁻¹ + 100 kg NPK ha⁻¹ + 50 kg N ha⁻¹ ; T3 = 15 t (poudre) ha⁻¹ + 100 kg NPK ha⁻¹ + 50 kg N ha⁻¹ ; T4 = 15 t (biochar) ha⁻¹ + 50 kg NPK ha⁻¹ + 25 kg N ha⁻¹ et T5 = 15 t (poudre) ha⁻¹ + 50 kg NPK ha⁻¹ + 25 kg N ha⁻¹. Les paramètres agronomiques du maïs et son rendement ainsi que les propriétés physico-chimiques des sols après la récolte ont été mesurés dans ces parcelles. Les résultats ont été analysés par STATGRAPHICS suivi du test de comparaison multiple Fisher ($\alpha = 0,05$). L'application du biochar et de la poudre sur ce sol a entraîné une augmentation du rendement de maïs de +54,64 %, +38,46 % et +45,88 % respectivement avec les traitements T2, T3 et T4 comparé au traitement recommandé (T1). Le même effet positif a été observé sur le sol après la récolte par rapport au traitement recommandé pour le phosphore assimilable : $8,67 \pm 0,19$ mg/kg (avec le biochar) et $6,34 \pm 0,21$ mg/kg (avec la poudre) ainsi que la CEC : $22 \pm 4,94$ méq/100 g avec la poudre. Le biochar et la poudre des balles de riz contribuent à réhabiliter la fertilité des sols et à accroître la productivité agricole lorsqu'ils sont combinés aux engrais chimiques. Ils peuvent assurer une production agricole durable.

Mots clés : Balles de riz, biochar, maïs, sol, Sanguéré Paul.

Effect of biochar and rice husk powder on maize (zea mays) productivity and soils in North Cameroon

Abstract

The objective of this study is to evaluate the effects of the application of biochar and rice husk powder combined with mineral fertilizer on the yield of the CMS-9015 variety of maize (*Zea mays*) and fertility. soils. The field experiment with three replicates covered 18 plots of 2.5 m × 2 m each arranged in a randomized random block design. The base treatment in all plots excepted null control T0 (without fertilizer or amendment) was the fertilizer dose NPK + Urea in full dose and half dose: T1: 100 kg NPK ha⁻¹ + 50 kg N ha⁻¹ (advisable treatment); T2 = 15 t (biochar) ha⁻¹ + 100 kg NPK ha⁻¹ + 50 kg N ha⁻¹; T3 = 15 t (powder) ha⁻¹ + 100 kg NPK ha⁻¹ + 50 kg N ha⁻¹; T4 = 15 t (biochar) ha⁻¹ + 50 kg NPK ha⁻¹ + 25 kg N ha⁻¹ and T5 = 15 t (powder) ha⁻¹ + 50 kg NPK ha⁻¹ + 25 kg N ha⁻¹. The agronomic parameters of maize and its yield as well as the physico-chemical properties of the soils after harvest were measured in these plots. The results were analyzed by STATGRAPHICS followed by the Fisher multiple comparison test ($\alpha = 0.05$). The application of biochar and powder on this soil resulted in an increase in maize yield of +54.64%, +38.46% and +45.88% respectively with treatments T2, T3 and T4 compared to the recommended treatment (T1). The same positive effect was observed on the soil after harvest compared to the recommended treatment for available phosphorus: 8.67 ± 0.19 mg/kg (with biochar) and 6.34 ± 0.21 mg/kg (with the powder) together with the CEC: 22 ± 4.94 meq/100 g with the powder. Biochar and rice husk powder help rehabilitate soil fertility and increase agricultural productivity when combined with chemical fertilizers. They can ensure sustainable agricultural production.

Keywords : Rice husks, biochar, maize, soil, Sangueré Paul.

تأثير الفحم الحيوي ومسحوق قشر الأرز على إنتاجية الذرة والتربة في شمال الكاميرون

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم آثار تطبيق الفحم الحيوي ومسحوق قشر الأرز مع السماد المعدني على محصول نوع الذرة ص.م.س. 9015 وخصوبة التربة. غطت التجربة الميدانية بثلاث مكررات 18 قطعة مساحة كل منها 2.5 م × 2 م مرتبة في تصميم قطاعات عشوائية. تم قياس المعلمات الزراعية للذرة ومحصولها وكذلك الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة بعد الحصاد في هذه القطع. أدى تطبيق الفحم الحيوي والمسحوق على هذه التربة إلى زيادة محصول الذرة + 54.64٪، + 38.46٪ و + 45.88٪ على التوالي مع المعاملات T2 و 3T و 4T مقارنة بالمعاملة الموصى بها (T1). لوحظ نفس التأثير الإيجابي على التربة بعد الحصاد مقارنة بالمعالجة الموصى بها للفوسفور المتاح: $8.67 \pm$ 0.19 مجم / كجم (بالفحم الحيوي) و 6.34 ± 0.21 مجم / كجم (مع المسحوق) وكذلك CEC: 22 ± 4.94 ميغ / 100 غ مع البودرة. يساعد الفحم الحيوي ومسحوق قشر الأرز في إعادة تأهيل خصوبة التربة وزيادة الإنتاجية الزراعية عند دمجها مع الأسمدة الكيماوية. يمكنهم ضمان الإنتاج الزراعي المستدام

الكلمات المفتاحية: قشور الأرز، فحم نباتي، ذرة، تربة، سانجوير بول.

Introduction

Au Nord-Cameroun, les sols les plus répandus et les plus cultivés appartiennent aux classes des sols ferrugineux différenciés ou lixisols (majeure partie des sols cultivables), des halomorphes et des vertisols (Basga et Nguetnkam, 2015). Les premiers, sont des sols acides et les seconds plutôt neutres voire légèrement basiques. Leur mise en culture continue provoque généralement une acidification et une grande sensibilité à l'érosion qui mobilise les particules fines et les nutriments (Brabant et Gravaud, 1985 ; Guibert et *al.*, 2002 ; Nguetnkam et Dultz, 2014 ; Basga et *al.*, 2018). Par ailleurs, l'introduction des engrais minéraux est peu efficace pour ces sols parce que les nutriments sont très rapidement lessivés. Bien plus, les petits paysans de la région du Nord Cameroun n'ont pas suffisamment des moyens financiers pour se procurer les intrants chimiques nécessaires pour augmenter leurs productions (Bekunda et *al.*, 2010). Face à ce problème, le Cameroun dans le document intitulé « Stratégie Nationale de Développement 2020-2030 » en abrégé SND30 vise à réduire la dépendance vis-à-vis des importations à travers la politique dite « d'import-substitution ». Il convient donc de trouver les ressources locales disponibles pouvant assurer la substitution des engrais chimiques et d'assurer la gestion durable des sols. A cet effet, plusieurs techniques de gestion durable de la fertilité des sols ont été adoptées dans les différentes régions du monde. Parmi ces techniques figurent l'utilisation de la fumure organique en combinaison avec la fumure minérale (Olin et *al.*, 2008), l'utilisation des résidus des cultures et cultures sous couvertures végétales (Olin et *al.*, 2008 ; Hinimbio, 2019) et plus récemment l'utilisation du biochar (Boris, 2017 ; Sadou, 2019). La technologie du biochar s'est basée récemment sur la transformation des balles de riz en compost (Garba et *al.*, 2020), en vermicompost (Guei et *al.*, 2020) et en biochar (Lompo et *al.*, 2021). Cette technologie du biochar connaît un succès dans la restauration des sols agricoles dégradés à travers le monde. Grâce à sa capacité d'adsorption, le biochar constitue un habitat pour les microorganismes en particulier les bactéries (Thies et Rillig, 2009). Son incorporation aux sols agricoles augmente la rétention des éléments nutritifs en améliorant la capacité d'échange cationique (Liang et *al.*, 2006 ; Lehmann et Joseph, 2009). A propos, plusieurs études rapportent que l'ajout de biochar dans le sol permet d'augmenter le contenu en azote, phosphore, potassium et celui du carbone total (Biederman et Harpole, 2013 ; Mukherjee et *al.*, 2014). Phuong (2017) affirme que le biochar augmente la biodisponibilité du phosphore dans le sol.

Sur le plan agronomique, plusieurs études ont été rapportées sur la culture du maïs avec des biochars de diverses origines. Dans certaines de ces études, l'application du biochar a induit une augmentation du rendement de 2,2 t ha⁻¹ par rapport au témoin (Sukartono et *al.*, 2011), dans d'autres une augmentation de 20% à 140 % par rapport au témoin (Oguntunde et *al.*, 2004 ; Crane-Droesch et *al.*, 2013). Au Cameroun, l'usage du biochar en agriculture a eu un double effet positif. Il a permis de corriger le problème d'acidité des sols en rehaussant le pH des sols rouges lessivés de l'Ouest du Cameroun (Boris, 2017). Aussi, le biochar a induit l'augmentation du rendement de maïs en combinaison avec l'engrais minéral. Bien que le biochar agit comme « restructurateur » du sol et permet d'augmenter les rendements agricoles, il pourrait

toutefois soit stimuler ou inhiber la germination et la croissance de certaines espèces (Chan et al., 2008 ; Free et al., 2010). Ce constat soulève la question de savoir si la technologie du saupoudrage permet également d'améliorer les propriétés physico-chimiques des sols et le rendement de maïs. D'où l'intérêt de cette étude qui vise à valoriser les balles du riz et la biomasse localement disponible dans la production agricole en vue d'une gestion intégrée de la fertilité des sols.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

L'étude s'est effectuée dans la localité de Sanguéré Paul au Nord du Cameroun, entre les latitudes 9°15'66"-9°16'86"N et les longitudes 13°25'74"-13°29'34"E (**figure 1**). Le climat est soudanien avec deux saisons contrastées : une humide de mai à octobre et une sèche de novembre à avril. Les précipitations annuelles totales varient entre 900 et 1500 mm (**tableau 1**) et la température annuelle moyenne est de 28°C (Basga et Nguetnkam, 2015). La végétation naturelle se compose de hautes herbes, d'arbres à feuilles caduques et de savanes (Sighomnou, 2003). La topographie est légèrement ondulée avec des collines basses arrondies, parfois des crêtes souvent allongées, indiquant le cadre résiduel caractéristique d'un terrain de sous-sol typique, avec une altitude moyenne comprise entre 300 et 500 m au-dessus du niveau de la mer (Bessong, 2012). Les formations géologiques comprennent le grès, le granite, la migmatite, le gneiss pegmatite (Ngounounou et al., 2001, 2003). Les formations superficielles sont constituées de sols ferrugineux (lixisols), des hydromorphes et de vertisols, ces derniers étant les sols les plus abondants (Brabant et Gavaud, 1985 ; Raunet, 2003 ; Basga et Nguetnkam, 2015 ; Tamfuh et al., 2018).

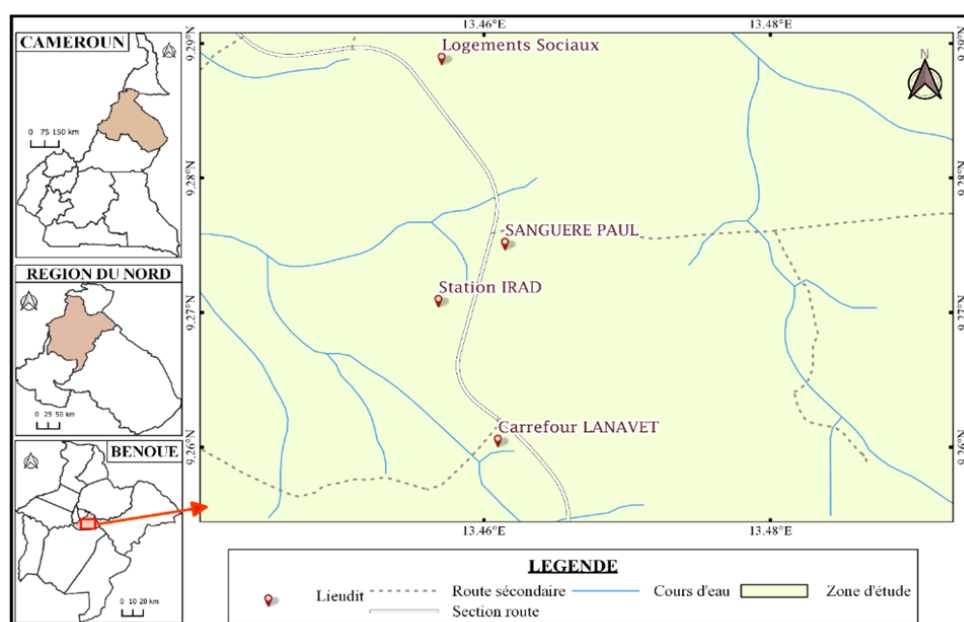


Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude

Tableau 1. Pluviométrie de mars à octobre 2021 de la localité de Sanguéré Paul

| Mois | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre |
|-------------------|------|-------|------|-------|---------|-------|-----------|---------|
| Pluviométrie (mm) | 12,0 | 70,5 | 39,0 | 211,0 | 190,0 | 332,5 | 168,0 | 38,0 |

Source : Station IRAD

Etude morphologique

L'étude morphologique a consisté à ouvrir un puit au niveau du champ expérimental (**figure 2**) et de caractériser les différents horizons. Le champ se trouve au sein de la ferme agricole de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD). Les principaux caractères de recherche étaient la couleur, l'épaisseur des horizons, la texture et la structure. L'horizon cultural a été échantillonné, conditionné et envoyé au laboratoire des sols de l'université de Dschang, Cameroun pour des analyses physico-chimiques.

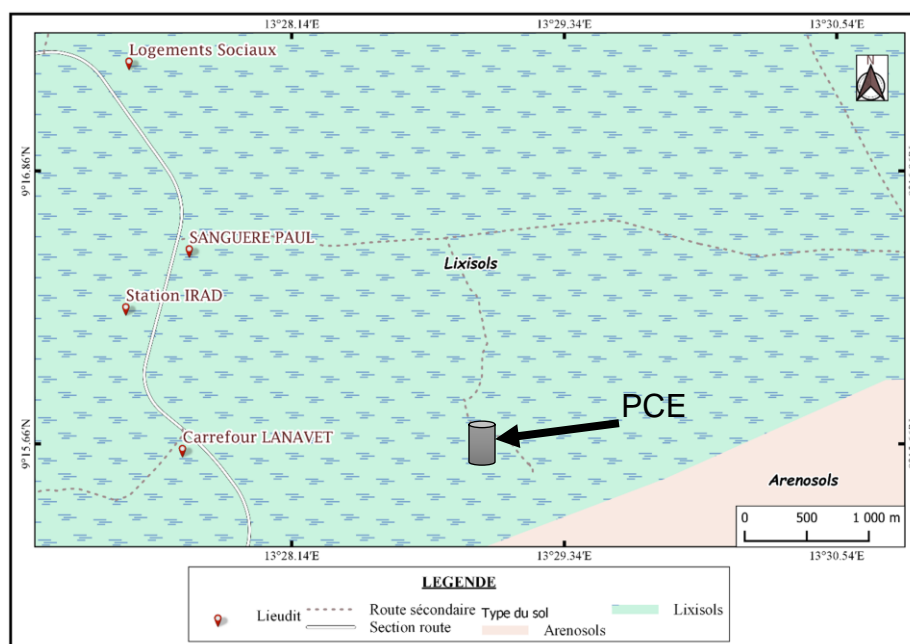


Figure 2. Profil du Champ expérimental (PCE)

Production du biochar et de la poudre des balles de riz

Le biochar a été produit à partir d'un four artisanal (température moyenne = 300°C et temps = 6 heures) confectionné à partir d'un fus de 200 L avec un faible apport d'oxygène. La poudre a été obtenue par broyage à l'aide d'un moulin et tamisage. Le biochar et la poudre utilisés ont un diamètre ≤ 2 mm. Les balles de riz ayant permis la production du biochar et de la poudre ont été collectés à Sanguéré Paul. L'intérêt

résultait de leur disponibilité locale, de leur accessibilité, de leur faible coût d'exploitation et de leur large extension géographique.

Etude expérimentale

Le champ expérimental a été le bloc complet randomisé comportant quatre (04) traitements avec trois répétitions et deux (02) témoins (T0 et T1). Chaque unité expérimentale mesure 2,5 m de long et 2 m de large, soit 5 m² de superficie. Les quantités d'engrais minéral NPK (14-23-14) et d'urée (46-0-0) apportées respectivement sur 5m² et rapportées en Kg. ha⁻¹ sont présentées dans le **tableau 2** exceptés le témoin (T0). Le biochar et la poudre ont été incorporés à raison de 7,5 kg/5m² soit 15T. ha⁻¹ (Lui et al., 2012) dans toutes les unités expérimentales sauf les unités expérimentales T0 et T1.

Tableau 2. Quantités d'engrais minéral et d'urée apportées sur 5m²

| Traitements | Quantité en Kg sur 5m ² | Quantité en Kg.ha ⁻¹ |
|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Premier épandage : 14 jours après le semis | | |
| T1, T2, T3 | 0,05 NPK + 0,025 Urée | 100 NPK + 50 Urée |
| T4, T5 | 0,025 NPK + 0,0125 Urée | 50 NPK + 25 Urée |
| Deuxième épandage : 30 jours après le semis | | |
| T1, T2, T3 | 0,05 Urée | 100 Urée |
| T4, T5 | 0,025 Urée | 50 Urée |

T1 : Traitement avec dose normale NPK + urée ; T2 : Biochar + Traitement dose normale NPK + urée ; T3 : Poudre + Traitement dose normale NPK + urée ; T4 : Biochar + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée ; T5 : Poudre + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée.

Après le désherbage, le labour (30 cm de profondeur) et le piquetage, l'incorporation du biochar et de la poudre de balles de riz (T2, T3, T4, T5) a été effectué à 18 jours avant le semis. Le maïs a été semé avec un écartement entre les lignes de 0,5 m et entre les poquets de 0,25 m à raison de 2 graines par poquet. Le démariage a eu lieu deux semaines après pour laisser un seul plant par poquet avec 5 lignes et 10 plants par ligne pour une densité totale de 50 plants de maïs par unité expérimentale. La fertilisation chimique (engrais NPK et urée) a été effectuée dans les sous-parcelles selon les recommandations pour la culture de maïs, exceptées la sous-parcelle témoin (T0) à 14 jours et 30 jours après la levée. Le soin apporté comprenait le sarclage manuel, 2 fois pendant la campagne culturale et le buttage.

Les paramètres agronomiques ont été évalués par rapport aux lignes centrales afin d'éviter l'effet de bordure. Ces lignes forment la surface d'observation au niveau de chaque unité expérimentale constituée de 27 plants. Les paramètres évalués ont été : (i) le taux de levée, compté au fur et à mesure, (ii) la hauteur du plant mesurée à 14, 30 et 60 jours après le semis à l'aide d'une règle graduée, (iii) le nombre d'épis évalué par comptage et (iv) Le rendement évalué par pesé des épis par unité de surface d'observation. Ledit rendement a été converti en tonnes par hectare par un facteur de conversion.

Analyses physico-chimiques des sols, du biochar et de la poudre

Les sols ont été prélevés au niveau de l'horizon cultural (20 cm) dans le site d'expérimentation qui couvrait une superficie de 5 hectares selon la méthode des diagonales (Godefroy, 1990). Cette méthode a consisté à marcher en suivant les diagonales du champ et à prélever un échantillon tous les 10 m. Après chaque prélèvement, la tarière est nettoyée à l'aide d'une machette et l'échantillon qu'il contient est rafraîchi à l'aide de la machette. Le 1/3 de la partie supérieure de la tarière est enlevé afin d'éviter l'effet de la contamination. Les 2/3 restants sont introduits dans le sac. Les différents échantillons prélevés sont homogénéisés puis divisés suivant la méthode de quartage afin d'obtenir l'échantillon final.

Les analyses ont été réalisées au laboratoire des sols de l'université de Dschang, Cameroun sur l'échantillon final. Le Carbone Organique a été dosé par la méthode Walkley et Black (Pauwels et al., 1992). L'azote a été déterminé selon la méthode de Kjeldahl (Pauwels et al., 1992). Le phosphore assimilable (Pass) a été déterminé par la méthode Bray 2 (Pauwels et al., 1992). Le pH_{eau} du sol a été mesuré avec un pH-mètre équipé d'une électrode de verre dans des suspensions sol-eau 1:2,5 (Pauwels et al., 1992). Les cations basiques échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}) ont été extraits à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium neutre ($pH_{eau} = 7$) et leur quantité mesurée par spectrométrie d'émission de flamme et d'absorption atomique (Ross and Kettering, 2011). La somme de tous les cations basiques échangeables a été déduite comme suit $S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}$. La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée à l'aide d'un acétate d'ammonium neutre en trois étapes : saturation du complexe absorbant en ion NH_4^{+} et extraction des cations basiques échangeables ; élimination à l'alcool de la solution saturante de NH_4^{+} remplissant les trous de l'échantillon ; dosage de NH_4^{+} par distillation Kjeldahl après une désorption quantitative au KCl (Ross et Kettering, 2011). Le taux de saturation a été déduit de la somme des cations basiques échangeables (SBE) et de la capacité d'échange de cations (CEC) comme suit (SBE/CEC en %). Pour chacun des paramètres analysés avant et après la culture, trois prises d'essai ($n = 3$) ont été réalisées.

L'analyse du biochar et de la poudre (trois prises d'essai, $n = 3$) a porté sur le carbone organique (Pauwels et al., 1992), l'azote (Pauwels et al., 1992), le phosphore (Pauwels et al., 1992), le potassium (Ross et Kettering, 2011), le calcium (Ross et Kettering, 2011), le magnésium (Ross et Kettering, 2011) et le pH_{eau} (Pauwels et al., 1992) avec les méthodes et techniques précédemment citées.

Analyses statistiques

Les données recueillies au cours de cette étude ont été analysées à l'aide d'un logiciel statistique STATGRAPHICS Centurion pour Windows. Une analyse de variance à un facteur (traitement – variable) au seuil de probabilité de 5% a été effectuée sur chacune des variables et complétée par des tests des comparaisons multiples (Fisher HSD) pour préciser les différences entre les traitements sur les paramètres de la plante

(taux de levée, hauteur, nombre d'épis et rendement) et les paramètres physico-chimiques des sols.

Résultats

Caractéristiques morpho analytiques du site d'étude

Les données morphologiques indiquent que le site étudié se trouve à une altitude comprise entre 210 à 232 m dans lequel pousse une végétation herbacée et arborée. Un profil réalisé dans le site (**figure 3**) sur une épaisseur de 167 m montre une succession de trois horizons, gris en surface et rouge jaunâtre à rouge en profondeur. Il présente une texture sablo-limoneuse à limono-sableuse en surface et limono-argilo-sableuse en profondeur. Sa structure varie de particulaire à grumeleuse en surface et massive à polyédrique en profondeur.

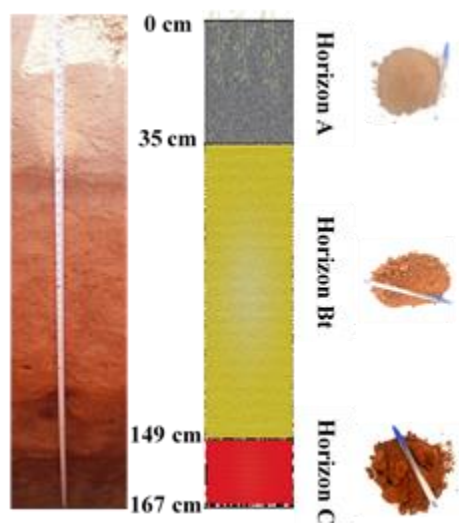


Figure 3. Profil PCE

Les données analytiques de l'horizon cultural (**tableau 3**) indiquent une forte acidité ($\text{pH} = 5,4 \pm 0,15$). Les teneurs en carbone organique ($\text{CO} = 1,34 \pm 0,05 \%$) et en matière organique ($\text{MO} = 2,32 \pm 0,06 \%$) sont faibles. La teneur en azote ($\text{Nt} = 0,22 \pm 0,01 \%$) ainsi que le rapport C/N ($\text{C/N} = 6,09 \pm 0,10$) sont très faibles. Le phosphore assimilable reste faible ($\text{P} = 5,04 \pm 0,13 \text{ mg/kg}$). La Somme des bases échangeables ($\text{SBE} = 1,83 \pm 0,13 \text{ méq/100 g}$) et la Capacité d'échange cationique ($\text{CEC} = 15 \pm 1,2 \text{ méq/100g}$) sont très faibles ainsi que la saturation ($\text{S} = 12 \pm 1,23 \%$). Il s'agit d'un lixisol dans lequel s'observe un lessivage des minéraux.

Tableau 3. Analyses physico-chimiques de l'horizon cultural du profil (moyenne ; erreur type de la moyenne ; $n^* = 3$).

| Profil | pH (H ₂ O) | CO (%) | MO (%) | Nt (%) | C/N | P _{ass} (mg/kg) | SBE (mégq/100 g) | CEC (mégq/100 g) | S (%) |
|--------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|------------------|------------------|--------------|
| H1 | 5,4 ± 0,15 | 1,34 ± 0,05 | 2,32 ± 0,06 | 0,22 ± 0,01 | 6,09 ± 0,10 | 5,04 ± 0,13 | 1,83 ± 0,13 | 15 ± 1,2 | 12 ± 1,23 |

CO : carbone organique ; MO : matière organique ; Nt : Azote total ; C/N : rapport carbone sur azote ; Pass : phosphore assimilable ; SBE : somme de bases échangeables ; CEC : capacité d'échange cationique ; S : saturation ; H1 : horizon cultural ; (*) : prise d'essai de chaque paramètre lors de sa détermination

Caractéristiques du biochar et de la poudre

Les caractéristiques chimiques du biochar et de la poudre (**tableau 4**) indiquent que **(i) Le biochar** expérimental présente un pH de $7,6 \pm 0,12$ qui est alcalin. Une alcalinité qui lui confère l'aptitude pour le chaulage des sols acides. Par ailleurs, ce biochar présente des teneurs relativement faibles en azote ($0,8 \pm 0,01$ %) et en phosphore ($0,36 \pm 0,01$ %). Par contre, la teneur en potassium ($2,43 \pm 0,05$ %) est relativement élevée. Les teneurs en éléments mineurs notamment le calcium ($1,45 \pm 0,03$ %) sont élevées par rapport à celles du magnésium ($0,4 \pm 0,01$ %). La teneur en carbone organique ($40,9 \pm 3,11$ %) est également élevée. **(ii) La Poudre** présente des teneurs en éléments majeurs (azote = $0,25 \pm 0,01$ %, phosphore = $0,21 \pm 0,01$ % et potassium = $0,32 \pm 0,01$ %) et mineurs (calcium = $0,18 \pm 0,01$ % et magnésium = $0,05 \pm 0,00$ %) inférieures à celles du biochar. Il en est de même pour la teneur en carbone organique ($38,55 \pm 3,01$ %) ainsi que le pH_{eau} ($6,7 \pm 0,13$) qui sont des valeurs inférieures à celles du biochar. Ces résultats indiquent que le biochar présente des capacités fertilisantes plus élevées que la poudre.

Tableau 4. Caractéristiques du biochar et de la poudre (moyenne ; erreur type de la moyenne ; $n^* = 3$).

| Paramètres | Biochar Expérimental | Poudre des balles de riz |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Nt (%) | $0,8 \pm 0,01$ | $0,25 \pm 0,01$ |
| P ₂ O ₅ (%) | $0,36 \pm 0,01$ | $0,21 \pm 0,01$ |
| K ₂ O (%) | $2,43 \pm 0,05$ | $0,32 \pm 0,01$ |
| CaO (%) | $1,45 \pm 0,03$ | $0,18 \pm 0,01$ |
| MgO (%) | $0,4 \pm 0,01$ | $0,05 \pm 0,00$ |
| CO (%) | $40,9 \pm 3,11$ | $38,55 \pm 3,01$ |
| pH eau | $7,6 \pm 0,12$ | $6,7 \pm 0,13$ |

(*) : prise d'essai de chaque paramètre lors de sa détermination

Evolution de la croissance du maïs

Le traitement n'a pas influencé la levée des plants du maïs qui a lieu à 4 jours après le semis. Par contre, la croissance en hauteur présente des différences significatives dans le temps (**tableau 5**). En effet, à 14 jours après le semis, il existe aucune différence significative entre les traitements. Les différences sont observables aux périodes de 30 et 60 jours après le semis entre le traitement normal (T1) et les traitements combinés avec le biochar et la poudre en dose complète d'engrais (T2 et T3) d'une part et en moitié de dose (T4 et T5) d'autre part. Ces résultats montrent que le biochar et la poudre améliorent positivement l'absorption et l'assimilation des engrais minéraux par les plantes même à une dose réduite d'engrais par rapport au traitement normal.

Tableau 5. Evolution de la croissance du maïs
(moyenne \pm erreur type de la moyenne)

| Traitements | Taux de levée (%) | Hauteur 14 JAS (cm) | Hauteur A 30 JAS (cm) | Hauteur A 60 JAS (cm) |
|-------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| T0 | 97,00 \pm 1,00 | 20,27 \pm 0,69 | 56,63 \pm 3,70 ^a | 90,79 \pm 8,00 ^{a*} |
| T1 | 98,00 \pm 1,00 | 19,89 \pm 0,92 | 53,06 \pm 0,89 ^a | 113,99 \pm 10,25 ^a |
| T2 | 98,33 \pm 0,57 | 21,19 \pm 2,08 | 78,47 \pm 6,12 ^b | 130,50 \pm 7,65 ^b |
| T3 | 97,33 \pm 1,52 | 20,37 \pm 0,28 | 61,43 \pm 5,58 ^c | 123,64 \pm 9,02 ^b |
| T4 | 97,66 \pm 0,57 | 19,77 \pm 1,27 | 75,11 \pm 4,15 ^b | 130,75 \pm 9,83 ^b |
| T5 | 96,66 \pm 1,52 | 19,44 \pm 0,56 | 61,07 \pm 4,93 ^c | 116,76 \pm 8,32 ^b |
| Probabilité | 0,5588 >>> 0,05* | 0,6339 >>> 0,05* | 0,0042 <<< 0,05 | 0,0357 < 0,05 |

(*) test de Fisher $\alpha = 5\%$; les valeurs ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$. T0 : Témoin ; T1 : Traitement avec dose normale NPK + urée ; T2 : Biochar + Traitement dose normale NPK + urée ; T3 : Poudre + Traitement dose normale NPK + urée ; T4 : Biochar + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée ; T5 : Poudre + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée

Rendement du maïs

L'analyse du rendement (**tableau 6**) ne montre pas de différence significative entre les moyennes des épis par plant d'un niveau de traitement à l'autre. Un tel résultat permet de conclure que le nombre d'épi par plant serait intrinsèque à la variété du maïs. En ce qui concerne le rendement, il existe une différence hautement significative entre le témoin (T0) et les autres traitements. Par ailleurs, il existe également une différence significative entre le traitement normal (T1) et les traitements avec le biochar et la poudre (T2, T3 et T4). Cette étude montre qu'avec une même dose d'engrais minéral (T1, T2 et T3), l'apport du biochar et de la poudre (T2 et T3) améliore le rendement (+54,64 % et +38,46 %, respectivement) en grains secs du maïs par rapport au traitement normal (T1). Bien plus, même à moitié de la dose d'engrais minéral (T4, T5), cet apport du biochar et de la poudre améliore significativement le rendement en grains secs du maïs par rapport au traitement normal (T1). Le rendement le plus élevé exprimé en tonnes par hectare (5,83 \pm 0,29) est obtenu avec le traitement T2, soit biochar + dose normale NPK + urée.

Tableau 6. Estimation du rendement en grains secs
(moyenne \pm erreur type de la moyenne)

| Traitements | Nombre d'épis par plant | Rendement (T/ha) | Rendement par rapport à T1 (T/ha) | Rendement par rapport à T1 (%) | Coefficient de variation (%) |
|-------------|-----------------------------------|---|---|--------------------------------------|------------------------------------|
| T0 | 1,00 \pm 0,00 | 1,55 \pm 0,25 ^a | -2,22 | -58,88 | 16,36 |
| T1 | 1,00 \pm 0,00 | 3,77 \pm 0,09 ^b | / | / | 2,44 |
| T2 | 1,33 \pm 0,57 | 5,83 \pm 0,29^e | + 2,06 | + 54,64 | 5,12 |
| T3 | 1,00 \pm 0,00 | 5,22 \pm 0,25^d | + 1,45 | + 38,46 | 4,86 |
| T4 | 1,00 \pm 0,00 | 5,50 \pm 0,33^d | + 1,73 | + 45,88 | 6,00 |
| T5 | 1,00 \pm 0,00 | 4,33 \pm 0,5 ^c | + 0,56 | + 14,85 | 11,54 |
| Probabilité | 0,4663 >>> 0,05 | 0,0001 <<< 0,05 | | | |

(*) test de Fisher $\alpha = 5\%$; les valeurs ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$. T0 : Témoin ; T1 : Traitement avec dose normale NPK + urée ; T2 : Biochar + Traitement dose normale NPK + urée ; T3 : Poudre + Traitement dose normale NPK + urée ; T4 : Biochar + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée ; T5 : Poudre + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée.

Bilan physico-chimique du sol cultivé

Les résultats d'analyses statistiques révèlent une différence significative ($\alpha = 0,05$) entre le traitement sans engrais chimique, ni amendement (T0) et les autres traitements (T1 à T5) pour tous les paramètres physico-chimiques mesurés, excepté l'azote totale ($F = 0,087 > \alpha = 0,05$) dont le traitement n'a pas influencé la teneur. Par ailleurs, par rapport au traitement conventionnel T1 (traitement exclusivement à base d'engrais chimique), l'association du biochar et la poudre des balles de riz avec l'engrais chimique n'a pas eu de différence significative au seuil $\alpha = 0,05$ pour les paramètres tels que le pH, le carbone organique, la matière organique, le rapport C/N et la somme des bases échangeables (SBE). Toutefois, une différence significative a été observée sur le phosphore assimilable ($F = 0,038 < 0,05$) entre le traitement conventionnel (T1) et les traitements amendés avec le biochar (T2) et la poudre des balles de riz (T3). Le même effet a été observé au niveau de la CEC avec le traitement T5. Le meilleur taux de saturation a été obtenu avec le traitement conventionnel (T1).

Tableau 7. Bilan physico-chimique du sol cultivé (moyenne ; erreur type de la moyenne ; n* = 3)

| Traitements | pH (H ₂ O) | CO (%) | MO (%) | Nt (%) | C/N | P (mg/kg) | SBE (méq/100 g) | CEC (méq/100 g) | S (%) |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| T0 | 5,4 ± 0,21 ^a | 1,69 ± 0,11 ^a | 2,91 ± 0,11 ^a | 0,09 ± 0,008 | 18,77 ± 3,21 ^a | 5,04 ± 0,23 ^a | 1,68 ± 0,22 ^a | 15 ± 3,27 ^a | 12 ± 1,11 ^a |
| T1 | 6,3 ± 0,12 ^b | 3,73 ± 0,18 ^b | 6,44 ± 0,17 ^b | 0,09 ± 0,004 | 43 ± 3,41 ^b | 5,11 ± 0,27 ^a | 6,1 ± 0,30 ^b | 14 ± 3,31 ^a | 44 ± 2,96 ^b |
| T2 | 6,4 ± 0,09 ^b | 3,31 ± 0,23 ^b | 5,7 ± 0,20 ^b | 0,09 ± 0,006 | 38 ± 3,48 ^b | 8,67 ± 0,19 ^b | 5,32 ± 0,31 ^b | 16 ± 3,21 ^a | 33 ± 3,15 ^c |
| T3 | 6,9 ± 0,17 ^b | 3,48 ± 0,14 ^b | 5,99 ± 0,21 ^b | 0,08 ± 0,005 | 44 ± 3,65 ^b | 6,34 ± 0,21 ^b | 3,17 ± 0,28 ^b | 15 ± 3,18 ^a | 21 ± 2,14 ^d |
| T4 | 6,0 ± 0,14 ^b | 3,43 ± 0,19 ^b | 5,92 ± 0,14 ^b | 0,1 ± 0,009 | 35 ± 3,70 ^b | 4,51 ± 0,15 ^a | 1,39 ± 0,21 ^a | 15 ± 3,21 ^a | 9 ± 1,21 ^a |
| T5 | 6,3 ± 0,10 ^b | 3,73 ± 0,21 ^b | 6,44 ± 0,36 ^b | 0,09 ± 0,006 | 40 ± 3,53 ^b | 4,34 ± 0,12 ^a | 7,68 ± 0,33 ^b | 22 ± 4,94 ^b | 35 ± 3,21 ^c |
| Probabilité | 0,027 < 0,05 | 0,043 < 0,05 | 0,014 << 0,05 | 0,087 > 0,05 | 0,048 < 0,05 | 0,038 < 0,05 | 0,034 < 0,05 | 0,047 < 0,05 | 0,038 < 0,05 |

Les valeurs ayant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil $\alpha = 0,05$. CO : carbone organique ; MO : matière organique ; C/N : rapport carbone sur azote ; Pass : phosphore assimilable ; SBE : somme de bases échangeables ; CEC : capacité d'échange cationique ; S : saturation ; T0 : Témoin ; T1 : Traitement avec dose normale NPK + urée ; T2 : Biochar + Traitement dose normale NPK + urée ; T3 : Poudre + Traitement dose normale NPK + urée ; T4 : Biochar + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée ; T5 : Poudre + 50 % Traitement dose normale NPK + 50 % urée ; (*) : prise d'essai de chaque paramètre lors de sa détermination.

Discussion

Propriétés chimiques du biochar et la poudre des balles de riz

Le biochar expérimental présente des teneurs en azote ($0,8 \pm 0,01$ %), et en potassium ($2,43 \pm 0,05$ %) supérieures à celles obtenues par (Lompo et al., 2021). Le potassium (K) étant un élément qui influence l'absorption des autres éléments, il favorise la floraison et la fructification. Par contre, les teneurs en phosphore ($0,36 \pm 0,01$ %), en Calcium ($1,45 \pm 0,03$ %) et en Magnésium ($0,4 \pm 0,01$ %) sont relativement faibles par rapport à celles obtenues par ces mêmes auteurs. Les teneurs en carbone organique ($40,9 \pm 3,11$ %) du biochar expérimental sont légèrement supérieures à celles obtenues par les auteurs (Sévérin, 2011 ; Lompo et al., 2021) et se situent dans la gamme pour les résidus culturaux (40 et 50 %) d'après la littérature (Cha et al., 2016). Le biochar expérimental a un pH de $7,6 \pm 0,12$ proche de 7,8 obtenu par Lompo et al. (2021). Cette alcalinité lui confère l'aptitude d'être utilisé pour le chaulage des sols acides (Frimpong et al., 2019). S'agissant de la poudre, les teneurs en carbone et azote de la poudre de balles de riz sont respectivement de $38,55 \pm 3,01$ % et $0,25 \pm 0,01$ %. Ces teneurs sont dans la gamme des valeurs obtenues par Béli (2002) dont le carbone varie de 35,80 % à 42,12 % et l'azote entre 0,38 % à 0,60 %. La valeur du carbone organique de la poudre lui confère une bonne aptitude d'utilisation comme amendement des sols. En effet, le carbone organique du sol est responsable d'une grande part de la fertilité des sols (Yost, 2019). Toutefois, les teneurs des autres paramètres sont légèrement inférieures aux valeurs moyennes du biochar.

Performance agronomique du biochar et de la poudre des balles de riz

Les deux produits (biochar et poudre) incorporés dans le sol ont eu des effets positifs sur le rendement du maïs. En effet, la croissance en hauteur est significativement différente à partir de 30 JAS. Les hauteurs sont élevées avec les traitements avec le biochar en dose de NPK complète (T2) et réduite (T4). Toutefois, à 60 JAS, la différence se trouve uniquement entre le témoin (T0) et les autres traitements. La croissance en hauteur étant lié à l'azote, ce résultat montre que le biochar et la poudre ont amélioré la disponibilité et l'absorption de l'azote par la plante. D'après Lui et al., (2012), l'azote et le phosphore contenus dans les « biochars » couvrent des gammes qui sont plus larges que ceux rapportées pour l'ensemble des fertilisants organiques connus. En ce qui concerne le rendement, cette étude montre qu'avec une même dose d'engrais minéral (T1, T2 et T3), l'apport du biochar et de la poudre (T2 et T3) améliore le rendement (+54,64 % et +38,46 %) en grains secs du maïs par rapport au traitement normal T1. Bien plus, même à moitié dose d'engrais minéral (T4, T5), cet apport du biochar et de la poudre améliore significativement le rendement en grains secs du maïs par rapport au traitement normal (T1). Le rendement le plus élevé exprimé en tonnes par hectare ($5,83 \pm 0,29$) est obtenu avec le traitement T2, soit biochar + dose normale NPK + urée. Ce rendement est largement supérieur au rendement moyen obtenu en culture traditionnelle (2 à 2,5 t/ha) dans la région septentrionale du Cameroun.

De ce fait, l'association du biochar et de la poudre des balles du riz avec l'engrais chimique permet d'améliorer la productivité du maïs. Les travaux de Sadou (2019) ont également montré l'importance de l'association du biochar combiné à l'engrais sur l'augmentation du rendement en grains secs du maïs sur les sols ferrugineux de Sanguéré paul. Les résultats similaires ont été obtenus par Lele (2016) qui, sur un sol sableux et acide de Kinshasa, ont également doublé le rendement du maïs avec l'apport d'une même dose de l'engrais minéral combiné au biochar par rapport à l'engrais minéral non combiné au biochar. Boris (2017) a obtenu une augmentation significative du rendement de maïs (54 % en première année et 51 % en deuxième année) dans les parcelles amendées au biochar par rapport à celles non amendées sur les sols rouges lessivés de Dschang-Cameroun. Bien plus, d'autres auteurs (Sukartono et al., 2011 ; Sparkes et Stoutjesdijk, 2011 ; Crane et al., 2013) parlent d'une augmentation du rendement de 2,2 tonnes par hectare, soit près de 20 % à 140 % par rapport au témoin. Sparkes et Stoutjesdijk (2011) ont conclu que l'utilisation du biochar aide à améliorer la croissance et la productivité de la plante. Toutefois, concernant la stabilité par rapport au traitement normal T1, le traitement avec la poudre (T3) est meilleur, suivi du traitement avec le biochar (T2). Au regard des résultats obtenus lors de cette campagne agricole, les traitements T2, T3 et T4 pourraient être recommandés car ils ont un bon rendement et un faible coefficient de variation.

Effet des traitements sur les propriétés physico-chimiques des sols cultivés

Le profil étudié est un lixisol (sol ferrugineux) dont les caractéristiques physico-chimiques ont très peu évolué dans le temps. Son faible potentiel organique et minéral avait été mis en évidence par Martin (1962). Ce faible potentiel agricole est dû à un lessivage des particules fines et des minéraux (Guibert et al., 2002 ; Nguetnkam JP et Dultz S, 2014 ; Basga et al., 2018). D'où l'intérêt de réhabiliter ce sol avec les balles de riz à travers le biochar et la poudre. La production du maïs avec ces amendements (biochar et poudre) issus des balles de riz en combinaison avec l'engrais chimique a induit une amélioration globale de tous les paramètres physico-chimiques du sol après la récolte par rapport au témoin (T0). Cependant par rapport au traitement conventionnel T1 (traitement avec l'engrais chimique seul), aussi bien le phosphore assimilable : $8,67 \pm 0,19$ mg/kg (avec le biochar) et $6,34 \pm 0,21$ mg/kg (avec la poudre) que la CEC : $22 \pm 4,94$ méq/100 g (avec la poudre) ont présenté un bilan positif dans les traitements. L'amélioration de la teneur en phosphore assimilable par les amendements permet de résoudre le problème lié à l'insuffisance du phosphore disponible dans les sols du Nord-Cameroun. La CEC joue un rôle important dans la rétention des éléments nutritifs du sol. Son amélioration va favoriser l'adsorption des autres éléments indispensables pour le sol et les cultures. Les résultats obtenus complètent ceux de Boris (2017) qui a également souligné une augmentation significative du pH (0,3 et 0,5 unités) et du carbone organique du sol (0,4 %) suite à l'application du biochar sur les sols rouges lessivés de Dschang-Cameroun.

Conclusion

Les sols étudiés de Garoua (Sanguéré Paul) sont limoneux-sableux, acides et présentent un faible potentiel organique et minéral dans lequel s'observe un lessivage. L'application du biochar et de la poudre des balles de riz a induit une augmentation du rendement de maïs de l'ordre de +54,64 %, +38,46 % et +45,88 % produit respectivement avec le biochar avec la dose complète d'engrais, la poudre avec la dose complète d'engrais et le biochar avec la moitié de la dose d'engrais comparé au traitement recommandé dans la région du Nord. L'analyse des sols après la récolte donne un bilan physico-chimique positif des sols ayant reçus le biochar et la poudre par rapport au traitement recommandé (engrais chimique seul) pour le phosphore assimilable : $8,67 \pm 0,19$ mg/kg (avec le biochar) et $6,34 \pm 0,21$ mg/kg (avec la poudre) et la CEC : $22 \pm 4,94$ méq/100 g. Les résultats globaux indiquent que le biochar et la poudre obtenue à partir des balles de riz lorsqu'ils sont combinés à l'engrais chimique, contribuent à accroître la productivité du maïs et à réhabiliter certaines propriétés chimiques du sol telles que le phosphore assimilable et la capacité d'échange cationique. Cette contribution permet de réduire l'usage des intrants chimiques de moitié et de soulager ainsi les exploitants agricoles dans un contexte de cherté d'engrais chimique. Toutefois, au vue de certaines difficultés liées à la production du biochar (température de pyrolyse, émissions gazeuses), la technologie du saupoudrage serait efficiente car il reste un système facile à mettre en œuvre, productif et protecteur de l'environnement.

Remerciements

Cette étude a été menée grâce aux soutiens scientifiques des encadreurs cités en co-auteurs.

Conflit d'intérêt

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.

Références bibliographiques

- Basga SD., Temga JP., Tsozue D., Danbe N. and Nguetnkam JP. (2018). Morphological, mineralogical and geochemical features of topomorphoc vertisols used for sorghum production in North Cameroon. *Eurasian Journal of Soil Science*. 7(4): 346 – 354.
- Godefroy J. (1990). Etude de l'échantillonnage du sol en bananeraies de Martinique. *Fruits*. 45(1). p. 3-7.
- Sévérin A. O. L. (2011). Production de biochar à partir de la balle de riz : De l'étude de la ressource à la valorisation du produit. Mémoire de master, 2IE. 50 pages
- Basga SD. and J P. Nguetnkam. (2015). Fertilizing Effect of Swelling Clay Materials on the Growth and Yield of Bean "*Phaseolus vulgaris*" on the Sandy Ferruginous Soils from Mafa Tcheboa (North Cameroon, Central Africa). *International Journal of Plant & Soil Science*. 5(1). p. 10-24.
- Bekunda M., Sangina N., and Woomer PL. (2010). Restoring Soil Fertility in Sub-Sahara Africa Chapter four. *Adv. Agron*. 108. p. 183-206.
- Béli N. (2002). Valorisation de la biomasse du Burkina Faso : Faisabilité de panneaux de particules à base de déchets agricoles & recherche de nouveaux biocides pour la préservation du bois à partir d'essences naturellement durables. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1. 145 pages.
- Bessong M. (2012) Paléo-environnement et diagénèse dans un réservoir gréseux d'âge crétacé du fossé de la Bénoué au Nord Cameroun : Les grés de Garoua. Thèse *PhD* de l'Université de Yaoundé I, 248 pages.
- Boris MDK. (2017). Production et utilisation du biochar pour l'amendement des sols rouges lessivés tropicaux. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada. 118 pages.
- Brabant P. and Gavaud M. (1985). Soils and land resources of North Cameroon (North and Far North Provinces). Paris, ORSTOM-MESRES-IRA.
- Cha JS., Park, SH., Jung SC., Ryu C., Jeon JK., Shin MC. and Park YK. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 40. p. 1 - 15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chan KY., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A. and Joseph S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Aust. J. Soil. Res*. 46. p. 437–444.
- Crane-Droesch A., Abiven S., Jeffery S. and Torn MS. (2013). Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environ. Res. Lett*. 8. p. 1–8.
- Etia PM. (1980). Climate and climatic zones of Cameroon. In: *Les Atlas Jeune Afrique*, Jeune Afrique, Ed. Paris. p. 16-19.
- Free H., McGill C., Rowarth J. and Hedley M. 2010. The effect of biochars on maize (*Zea mays*) germination. *New Zealand J. New Zeal J Agric Res*. 53. p. 1–4.
- Frimpong ME., Nartey EK., Adjadeh TA., Darko DA., Lawson IYD. and Amoatey CA. (2019) *West African Journal of Applied Ecology*. 27 (2). p. 32 – 50.
- Garba O., Mella MT., Kiari SA., Grema MHI. et Zanguina A. (2020). Valorisation de glume de mil et balle de riz par compostage : caractérisations physico-chimiques des composts. *Afrique Science* 17(4). p. 29 – 38. <http://www.afriquescience.net>

- Gee GW. and Bauder JW. 1986. Particle size analysis in methods of soil analysis, Part 1. In: Second Edition. Madison, Wisconsin USA: Madison, Wisconsin USA. p. 383–409.
- Guei AM., Zro, FGBi., Bakayoko, S. and Ta FDB. (2020). Effets du vermicompost à base d'ordures ménagères associées aux balles de riz sur les paramètres agronomiques du maïs (*Zea mays* L.). *Journal of Applied Biosciences*. 154. p. 15862 – 15870.
- Guibert H., M'biandoun M. et Olina JP. (2002). Productivité et contraintes des systèmes de culture au Nord-Cameroun In : Jamin JY. and Seiny Boukar L. (eds.) Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes de colloque, Maroua Cameroun. N'Djamena, Tchad, [Cédérom]. PRASAC.
- Hinimbio TP. (2019). Réhabilitation de la fertilité des sols par usage des bioressources (*Crotalaria juncea* L. et *Brachiaria ruziziensis* G.&E.) en zone cotonnière de l'Extrême-Nord, Cameroun. Thèse de Doctorat, Université de Maroua, Cameroun. 238 p.
- Lehmann J. and Joseph S. (2011). Biochar for Environmental Management: An Introduction. Earthscan, Dunstan House, 14a St Cross Street, London, EC1N 8XA, UK, 449 p.
- Lehmann, J. and Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management – *Science and Technology*. Earthscan, London. 405 p.
- Lele Nyami B. (2016). Potentiel d'amélioration de la fertilité des sols sableux et acides de Kinshasa (RDC) par l'usage du charbon des bois (biochar), de la biomasse végétale et des engrais minéraux. Thèse de doctorat ÉRAIFT. 243 p.
- Letouzey R. (1985) Carte phytogéographique du Cameroun au 1/500 000. Institut de Recherche Agronomique. Yaoundé-Cameroun et Institut de la Carte Internationale de la Végétation Toulouse-France, Paris. p. 2-9.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad JO., Thies J., Luizão FJ., Petersen J., and Neves E.G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 70. p. 1719–1730.
- Lompo DJP., Ouedraogo LYeS., Sori SI, et Nacro HB. (2021). Caractérisation chimique d'un biocharbon de balles de riz destiné à l'amendement des sols au Burkina Faso. *Afrique Science* 18(1). p. 216 - 222. <http://www.afriquescience.net>.
- Lui J., Schulz H., Brandl S., Miehtke H., Huwe B. and Glaser B. (2012). Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 175(5). p. 698-707.
- Martin D. (1962). Etude pédologique du casier de Sanguéré. I. R. CAM Yaoundé. 21 p.
- Mukherjee, A., Zimmermann, A.R., Hamdan, R. and Cooper, W.T. 2014. Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months of field aging. *Solid Earth*. 5. p. 693–704.
- Ngounouno I., Déruelle B., Demaiffe D. and Montigny R. (2003). Petrology of the Cenozoic volcanism in the upper Benue valley, northern Cameroon (Central Africa). *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 145(1). p. 87-106.
- Ngounouno I., Moreau C., Déruelle B., Demaiffe D. et Montigny R. (2001). Pétrologie du complexe alcalin sous-saturé de Kokoumi (Cameroun). *Bulletin de la Société Géologique de France*. 172 (6). p. 675-686.

- Nguetnkam JP and Dultz S. (2014). Clay dispersion in typical soils of North Cameroon as a function of pH and electrolyte concentration. *Land Degrad. Develop.* 25. p. 153-162.
- Oguntunde PG., Fosu M., Ajayi AE and Van De Giesen N De. 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biol Fertil. Soils.* 39. p. 295–299.
- Olina Bassala JP, M'Biandoun M., Ekorong JA. et Asfom P. (2008). Evolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier-céréales au Nord Cameroun : diagnostic et perspectives. *Tropicultura.* 26(4). p. 240-245.
- Pauwels J, Van Ranst E, Verloo M et Mvondo Ze A. 1992. Manuel de Laboratoire de Pédologie - méthodes d'analyses de sols et de plantes ; équipement et gestion des stocks de verrerie et de produits chimiques. Publications Agricoles N°. 28, A.G.C.D. Bruxelles, Belgique. 180 p.
- Phuong TN, Morel C., Benbrahim M., Fioux P., Mustin, C. et Naisse C. (2017). Le biochar et la dynamique du Phosphore. 13. Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse du COMIFER-GEMAS, Nov 2017, Nantes, France.
- Raunet M. (2003). Some Key Morpho-Pedological Aspects of North Cameroon of Use to Agronomists, Montpellier: CIRAD, 24.
- Ross D. and Kettering Q. (2011). Chapter 9. Recommended methods for determining soil cation exchange capacity. Recommended Soil Testing Procedures for Northeast United States. Coop Bull No 493. p. 75–86.
- Sadou H. (2019). Réponse de l'amendement au biochar et à la fumure organique combinés à l'engrais minéral sur la culture du maïs (*Zea mays* L.). Mémoire de Master, Université de Maroua. Cameroun. 70 p.
- Sighomnou D. (2003). Gestion intégrée des eaux de crues. Cas de la plaine d'inondation du fleuve Logone. CRH/IRGM, Yaoundé. p. 1-7.
- Sparkes J. and Stoutjesdijk P. (2011). Biochar: Implications for Agricultural Productivity Australian Government. ABARES technical report 11.6, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, Canberra. ISSN 189-3128 (online).
- Sukartono S., Utomo WH., Kusuma Z. and Nugroho WH. (2011). Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *J. Trop. Agric.* 49. p. 47–52.
- Tamfuh AP., Djoufac Woumfo E., Temgoua E., Boukong A. and Bitom D. (2018). Moisture content, moisture-related properties, and agricultural management strategies of the Benue floodplain vertisols in North Cameroon. *African Journal of Agricultural Research.* 13(33). p. 1730-1746.
- Thies JE. and Rillig M. (2009). Characteristics of biochar: biological properties. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. *Earthscan, London.* p. 85–105.
- Yost JL. and Hartemink AE. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in Agronomy.* 158:217-310. DOI: 10.1016/bs.agron.2019.07.004