

GESTION EFFICIENTE DES NUTRIMENTS PAR L'UTILISATION DE BIOCHAR ET COMPOST DANS UN SYSTEME ZAI AU CENTRE-NORD DU BURKINA FASO

F. SABA^{1,2,4*}, H. SAWADOGO⁴, J.-T. CORNELIS^{2,3}, A.-K. OUEDRAOGO¹, D. Cisse^{1,2,5}, K. COULIBALY¹, H. B. NACRO¹

¹Université Nazi BONI/Laboratoire d'étude et de recherche sur la fertilité des sols (LERF) ;

²TERRA Teaching and Research Centre, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, Gembloux, Belgium

³ Faculty of Land and Food Systems, The University of British Columbia, Canada

⁴Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles/Département Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production.

⁵Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles

*E-mail correspondant : fati.saba@yahoo.fr

RESUME

Pour faire face à la dégradation des sols, les producteurs des zones arides ont développé le *zai*, technique de collecte d'eau et de nutriments, pour restaurer la productivité de leurs sols. Cependant, les effets bénéfiques du *zai* sont en déclin faute d'amendements de qualité, la baisse et la mauvaise des précipitations. Un dispositif en blocs randomisé comportant T0= 3125 kg compost /ha; T1 = 3125 kg biochar/ha + 62,5 kg NPK/ha et 31,25 kg d'urée/ha ; T2 = 62,5 kg NPK/ha et 31,25 kg d'urée/ha; T3 = 62,5 kg biochar-SRF/ha et 31,25 kg d'urée/ha; T4 = 62,5 kg biochar/ha + 62,5 kg NPK/ha et 31,25 kg d'urée/ha et T5 = 3125 kg compost/ha + 100 kg NPK/ha et 50 kg d'urée/ha a été mis en place au Centre-Nord du Burkina Faso, pour évaluer l'efficacité du biochar activé avec une solution de NPK (biochar-SRF) en comparaison avec les pratiques vulgarisées. Après deux campagnes d'expérimentation, les analyses chimiques montrent que les amendements ont amélioré les paramètres du sol de 2 à 285 %. Les rendements grain du sorgho ont augmenté de 10 à 85 % avec le biochar-SRF comparativement au témoin. Par conséquent, le biochar-SRF peut être vulgarisé comme une alternative durable à la fertilisation classique.

Mots clés : dégradation de sol ; *zai*, efficacité, biochar-SRF, Burkina Faso.

ABSTRACT

EFFICIENT MANAGEMENT OF NUTRIENT IN ZAI SYSTEM USING BIOCHAR AND COMPOST IN CENTRAL NORTH REGION OF BURKINA FASO

In response to soil degradation, farmers in the drylands have developed zai, a water and nutrient harvesting technique to restore soil productivity. However, the beneficial effects of zai are declining due to lack of quality organic matter and decreasing rainfall. A randomized block design with T0 (control) = 3125 kg compost /ha; T1= 3125 kg biochar/ha + 62,5 kg NPK/ha and 31,25 kg urea/ha ; T2= 62,5 kg NPK/ha and 31,25 kg urea/ha; T3= 62,5 kg biochar-SRF/ha and 31,25 kg urea/ha; T4 = 62,5 kg biochar/ha + 62,5 kg NPK/ha and 31,25 kg urea/ha et T5 = 3125 kg compost/ha + 100 kg NPK and 50 kg urea/ha was conducted to evaluate effectiveness of biochar associated to mineral fertilizer, biochar Slow Release Fertilizer (Biochar-SRF) produced by cotton stalk biochar and activated by mixing with NPK solution. These treatments were compared to control; farmers practice and conventional practice. After two seasons of experimentation, chemical analysis showed that the amendments improved soil parameters by 2 to 285%. Sorghum's grain yields increased by 10 to 85% with biochar-SRF. Therefore, biochar-SRF can be promoted as a sustainable alternative to conventional fertilization.

Keywords: soil degradation, *zai*, efficiency, biochar-SRF, Burkina Faso

INTRODUCTION

Dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, la dégradation des sols et les sécheresses constituent les principaux facteurs limitants de la production agricole. Dans la région du Centre-Nord du Burkina Faso, les conditions pédologiques et climatiques ont conduit à des sols fortement dégradés avec de très faibles réserves en nutriments et en eau, ce qui constitue une menace pour la sécurité alimentaire (Bayen *et al.*, 2011). Dans cette région, la dégradation des sols est marquée par la présence de croûtes imperméables à l'eau en surface, qui se traduit par l'apparition des terres nues appelées clairières ou *zipella* en langue locale mooré (Yaméogo *et al.*, 2013). L'une des méthodes anciennes de restauration de fertilité, est l'application de la matière organique notamment du fumier, du compost, ou les deux dans le *zaï*. Le *zaï* est une forme particulière de culture en poquets concentrant les eaux de ruissellement et les matières organiques dans de micro-bassins de surfaces pédologiques encroûtées fortement dégradées (Roose *et al.*, 1993). Dernièrement, les effets bénéfiques du *zaï* sont en déclin en raison de la baisse et la mauvaise répartition des précipitations, et du faible accès à la matière organique de qualité (Troy et Picaud, 2013). De plus, les travaux de recherche (Barro *et al.*, 2007) ont montré que la forte demande en main d'œuvre du *zaï* (300 h/ha), constitue une contrainte à sa pratique. Dans le souci de trouver des solutions à la baisse de performances du *zaï*, nous avons choisi de tester et comparer l'efficacité de l'utilisation du biochar aux amendements classiques (compost, fumier) dans un système *zaï*. Le biochar est un constituant organique poreux hautement résistant à la dégradation, car issu de la pyrolyse de la biomasse sous apport limité d'oxygène (O₂), et utilisé comme amendement pour améliorer la productivité des sols (Cornelissen *et al.*, 2016).

Les travaux de Jeffery *et al.*, (2017) ont montré que le biochar augmente significativement le rendement des cultures, et par conséquent pourrait constituer une alternative très prometteuse pour le continent africain où la faible productivité agricole est un défi majeur. Spécifiquement dans les sols tropicaux, l'effet chaulant du biochar favoriserait la disponibilité de certains éléments nutritifs fortement retenus

par le sol, notamment les phosphates (Gwenzi *et al.*, 2018). De même, le biochar agirait comme fournisseur de nutriments, ou en renforçant la capacité d'échange cationique et la quantité de nutriments échangeables tels que Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ qui sont des éléments bénéfiques à la fertilité des sols (Ding *et al.*, 2016). Sur le plan physique, l'action bénéfique du biochar sur le sol est liée à sa grande porosité et surface spécifique ainsi qu'à la diminution de la densité apparente, ce qui améliore la capacité de rétention en eau et la croissance des plantes (Verheijen *et al.*, 2019 ; Razzaghi *et al.*, 2020).

Dans le souci de rendre le biochar accessible à la majorité des producteurs en vulgarisant des doses modérées, certains auteurs (Hagemann *et al.*, 2017; Schmidt *et al.*, 2017) proposent de l'activer pour accroître son efficacité à faible dose. Dans le contexte burkinabé, l'introduction du biochar produit à partir de biomasses disponibles localement, représente à la fois une opportunité et un risque, si l'on considère que la biomasse est une ressource renouvelable mais limitée par une variété d'utilisations (énergie, alimentation de bétail, construction, etc.). De ce fait, la promotion de faibles doses de biochar permettra d'associer les petits producteurs qui auront des difficultés à mobiliser la biomasse pour produire des doses suffisamment élevées. L'activation du biochar consiste à l'enrichir par combinaison avec d'autres substances à forte teneur nutritives (compost, engrais minéraux, urine, etc.), pour améliorer son efficacité agronomique. Elle permet de produire des fertilisants à libération lente (biochar-SRF « Slow Release Fertilizer ») à moindre coût, comme alternative à la fertilisation minérale classique. Le biochar-SRF libère graduellement les éléments nutritifs dans la solution du sol, ce qui permet de répondre aux besoins des plantes sur une longue période avec des pertes minimales, d'où une amélioration de la productivité des sols et des rendements des cultures (Alshamaileh *et al.*, 2018 ; Gwenzi *et al.*, 2018). C'est donc une approche qui devrait permettre d'améliorer l'efficacité du *zaï*, en particulier dans un contexte de raréfaction de la ressource organique et du changement climatique. C'est dans ce cadre que s'est inscrite la présente étude, afin d'évaluer l'efficacité du biochar-SRF pour la restauration des sols dégradés et la production du sorgho dans un système *zaï* en zone de climat semi-aride.

MATERIEL ET METHODES

SITE EXPERIMENTAL

Les essais ont été conduits dans le village de Yilou, (13°01' Nord et 01°55' Ouest) dans la région du Centre-Nord au Burkina Faso. Son climat est de type soudano-sahélien, caractérisé par des précipitations concentrées sur une courte période de juin à octobre, et variant en moyenne entre 400 mm/an et 700 mm/an. Les précipitations annuelles enregistrées dans la zone au cours des deux campagnes d'expérimentation 2019 et 2020, ont été de 702 et 1027 mm/an réparties sur 32 et 42 jours respectivement. La campagne 2020 a été l'une des plus pluvieuses des dix dernières années, dont la moyenne est de 679 mm/an. Considérant cette moyenne, la mauvaise répartition des pluies constitue la principale menace du secteur agricole. Le choix de ce site se justifie par sa longue tradition de pratique du *zaï*, et la nécessité de promouvoir des ressources organiques disponibles et peu utilisées (tiges de cotonnier), comme alternatives aux amendements organiques classiques (compost, fumier).

Les types de sols dominants dans le village sont des Lixisols, Plinthosols et Cambisols (Diarisso *et al.*, 2016). Les essais ont été conduits sur un sol classé comme Lixisol, type de sols répandus dans le terroir, présentant une texture sableuse-limoneuse à la surface et argilo-limoneuse en profondeur.

MATERIEL EXPERIMENTAL

Le matériel végétal utilisé est le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), variété améliorée *Kapelga* (INERA/CIRAD, 2001) vulgarisée par l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) en raison de ses grandes potentialités agronomiques en zone soudano-sahélienne. C'est une variété de cycle semis-maturité de 90 à 100 jours, avec un rendement potentiel en grain de 2,8 t/ha.

Les fertilisants utilisés dans les poquets de *zaï* sont : le compost, le biochar non activé ou biochar pristine, le biochar-SRF, le NPK (14-23-14) et l'urée (46 % N). Le compost utilisé est obtenu par la technique de compostage en tas d'un mélange de résidus culturaux, d'herbacées et du fumier de bovin. Le biochar est issu de la pyrolyse des tiges de cotonnier

(*Gossypium hirsutum* (L.) sous une température comprise entre 500-700°C pendant 20 minutes dans un four *Kon-Tiki* (Cornelissen *et al.*, 2016). Ce biochar a été activé par macération dans une solution de NPK (rapport volumique 1/0,5) pour produire du biochar-SRF (Schmidt *et al.*, 2017). L'ensemble des fertilisants utilisés ont été chimiquement caractérisés (N, P, K, Ca, Mg, C-org) pour connaître leurs teneurs initiales totales

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est en blocs de Fisher complètement randomisé, comportant six (06) traitements répétés quatre fois. La parcelle élémentaire mesurait 40 m² (10m*4m). Les dimensions des poquets de *zaï* étaient de 40 cm de diamètre sur 15 cm de profondeur soit 31250 *zaï*/ha. Les traitements étaient composés de :

T0 (Témoin) = 100 g de compost / poquet de *zaï* ;

T1 (Biochar grande-dose) = 100 g de biochar pristine/poquet + 2 g de NPK/poquet + 1 g d'urée/poquet ;

T2 (Microdose d'engrais minéral) = 2 g de NPK/poquet + 1 g d'urée/poquet ;

T3 (Biochar-SRF) = 2 g de biochar-SRF/poquet + 1 g d'urée/poquet ;

T4 (Biochar petite-dose) = 2 g de biochar pristine/poquet + 2 g de NPK/poquet + 1 g d'urée/poquet ;

T5 (Dose vulgarisée) = 100 g de compost/poquet + 100 kg de NPK / ha + 50 kg d'urée/ha.

Le témoin (T0) correspond à la pratique paysanne. Le compost des traitements T0 et T5 et le biochar grande-dose (T1) ont été apportés à la dose de 100 g/*zaï* soit 3,125 t/ha. La microdose a consisté à l'application de 2 g/poquet de fertilisants (NPK, biochar-SRF, biochar petite-dose) soit 62,5 kg/ha et 1 g d'urée/poquet soit 31,25 kg/ha.

CONDUITE DE L'ESSAI

Les semis ont été réalisés manuellement et démarisés à trois plants au moment de l'application du NPK. L'écartement a été de 80 cm entre ligne et 40 cm entre poquet. Le biochar-SRF, le biochar pristine petite-dose (T4) et le NPK ont été apportés au 15^e jour après semis (JAS) à la dose de 2 g/poquet pour l'ensemble des traitements. Le traitement dose vulgarisée (T5) a reçu

l'épandage de 100 kg de NPK/ha. L'urée a été appliqué au 40^e JAS par microdose en raison de 1 g d'urée/poquet pour les traitements T1, T2, T3 et T4 soit 31,250 kg/ha, et par épandage de 50 kg d'urée /ha pour T5. La microdose est une technique qui consiste à une application stratégique de petites quantités d'engrais dans le trou de semis ou à la base des plantes peu après semis (Hayashi *et al.*, 2008). Trois sarclages manuels ont été effectués respectivement au 15^e, 36^e et 57^e JAS. La récolte a été faite manuellement à la maturité dans des parcelles utiles de 20,16 m², comprenant 3 lignes centrales de 21 poquets chacune.

COLLECTE DES DONNEES

L'efficacité des différents traitements a été évaluée à travers des mesures périodiques de la hauteur des plants, les rendements en pailles et en grains, le poids de mille grains, ainsi que la variation des paramètres chimiques (pH, C-org, CEC, N-total, P et K biodisponibles) et l'humidité du sol. La hauteur des plants a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban pliable, sur quinze plants choisis aléatoirement dans la parcelle utile à la première mesure (30 JAS). Les plants mesurés ont ensuite été marqués au collet à l'aide d'une ficelle pour faciliter leur identification pour les mesures du 45^e et 60^e JAS de chaque campagne agricole. A la maturité, la paille et les panicules ont été récoltées dans des parcelles utiles, séchées, puis pesées pour déterminer la biomasse aérienne. Le poids des grains ainsi que le poids de 1000 grains ont été déterminés après battage des panicules. Les données obtenues ont été extrapolées à l'hectare pour évaluer les rendements.

Les échantillons de sols ont été prélevés avant la mise en place de l'essai pour établir la situation de référence. Le second prélèvement a été effectué à la fin de la première campagne d'expérimentation. Les échantillons ont été prélevés sur la profondeur 0-20 cm. Le pH du sol a été déterminé par lecture directe à l'aide d'un pH-mètre dans une suspension diluée à 1/5 (rapport volumique) respectivement à l'eau distillée (pH-eau) et dans une solution de chlorure de potassium (1 mol/l) pour le pH-KCl (Pansu et Gautheyrou, 2003). Le carbone organique (C-org) et l'azote total (N-total) ont été déterminés par combustion sèche après décarbonatation selon la méthode Dumas (Caria *et al.*, 2007). La teneur des éléments biodisponibles (PO₄³⁻, K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺) dans le

sol a été évaluée après extraction dans une solution d'acétate d'ammonium-EDTA 1M (Lakanen et Erviö, 1971) dans laquelle les éléments (Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺) ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique, et le phosphore (P) par colorimétrie. La capacité d'échange cationique (CEC) a été mesurée en percolant des colonnes de sol avec de l'acétate d'ammonium 1M, tamponné à pH 7 (Metson, 1956). La granulométrie a été déterminée par la méthode à la «pipette Robinson» (Fournier *et al.*, 2012). Les résultats des différentes analyses ont servi à calculer la variation des paramètres chimiques par rapport à la situation initiale avant la mise en place de l'essai, selon la formule établie par Kaho *et al.* (2011).

$$X (\%) = \frac{X_2 - X_1}{X_1} * 100$$

X : correspondant à la variation du paramètre au cours de la campagne agricole,

X₁ : correspondant à la valeur du paramètre considéré au début de l'essai,

X₂ : est la valeur du paramètre considéré à la fin de l'expérimentation.

Selon la formule, les variations négatives suggèrent une diminution du paramètre du sol étudié, et les variations positives suggèrent une amélioration de la fertilité de sol exception faite du pH où l'augmentation n'est pas toujours accompagnée d'une amélioration de la fertilité.

L'humidité du sol a été mesurée directement à l'aide d'un humidimètre pour sol avec sonde Thêta (Gaskin & Miller 1996). Il s'agit de mesures ponctuelles effectuées à 50, 71 et 93 JAS durant la campagne de 2020. Ces dates correspondent respectivement aux stades montaison, floraison et pleine maturité du sorgho.

ANALYSES STATISTIQUES

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel statistique R, version 3.6.3. Une analyse de variance (ANOVA) à un facteur a été utilisée pour évaluer l'effet individuel des traitements sur la hauteur, les rendements, et la variation de la teneur en nutriments de sol. Le test de Tukey (HSD) a été utilisé pour la comparaison des moyennes, lorsque l'analyse de variance révèle des différences significatives entre les traitements, au seuil de probabilité de 5 %.

RESULTATS

PROPRIETES DU SOL ET DES FERTILISANTS UTILISES

Les essais ont été conduits sur des *parcelles aménagées en cordons pierreux*. La texture de surface de ces sols était de type argilo-sableuse (argile = 38 % ; limon = 25 % et sable = 37 %).

C'est un sol à acidité modérée (pH-eau = 6,7 et pH-KCl = 5,1) et faiblement pourvu en nutriments essentiels, avec une capacité d'échange cationique moyenne égale à 3,9 mEq/100 g (tableau 1). La teneur en azote total est <1 g/kg de sol ; les teneurs en cations Ca²⁺ et Mg²⁺ sur le complexe d'échange sont respectivement de 714 et 171 mg/kg de sol. La teneur initiale en carbone organique était de 6 g/kg de sol.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol avant la mise en place de l'essai.

Physico-chemical characteristics of the Lixisol and pristine biochar used for the experiment.

Caractéristiques	Sols	Biochar pristine
Argile totale (%)	38,3	-
Limon total (%)	24,4	-
Sable total (%)	37,3	-
Carbone organique (g/kg)	6	74,5
Azote total (g/kg)	0,7	1,5
C/N	9	-
Phosphore assimilable (mg/kg)	12	32
Potassium disponible (mg/kg)	177	141
Ca (mg/kg)	714	140
Mg (mg/kg)	171	20
pH-eau	6,7	9,8
pH-KCl	5,1	-
CEC (mEq/100 g de sol)	3,9	-
WHC	-	336,7
Densité apparente	-	70
Surface spécifique (m ² /g)	-	1,7

Les caractéristiques chimiques des fertilisants utilisés sont mentionnées dans le tableau 2. Les résultats montrent que les teneurs en azote, potassium et phosphore total, sont plus élevées dans le NPK que dans le biochar-SRF et le compost. Le taux de rétention des nutriments par le biochar était légèrement inférieur à la

concentration NPK, soit 53 % d'azote, 77 % de phosphore et 77 % de potassium disponible. Par contre, les teneurs en carbone, en Ca²⁺ et Mg²⁺, étaient relativement plus élevées dans le biochar-SRF que dans le NPK, soit 42 % 147 et 136 % respectivement.

Tableau 2 : Caractéristiques chimiques du compost, NPK et biochar utilisés comme fertilisants.
Characteristics of the compost, mineral NPK, biochars used as soil amendments.

Substrats	C-org (%)	N-total (%)	P-total (mg/kg)	K-total (mg/kg)	Ca-total (mg/kg)	Mg-total (mg/kg)	pH-eau
Compost	10,5 ± 0,2 ^b	0,8 ± 0,1 ^c	1554 ± 39 ^{ab}	9769 ± 267 ^{ab}	4931 ± 222 ^b	2939 ± 89 ^b	7,5 ± 0 ^b
Biochar-pristine	42,3 ± 0,8 ^d	0,7 ± 0,0 ^a	405 ± 39 ^a	5100 ± 692 ^a	3017 ± 146 ^a	606 ± 73 ^a	9,8 ± 0,4 ^c
Biochar-SRF	37,1 ± 0,2 ^c	6,1 ± 0,2 ^b	3689 ± 53 ^{bc}	11676 ± 3532 ^{bc}	3060 ± 660 ^a	941 ± 380	6,2 ± 0 ^a
NPK	3,2 ± 0,3 ^a	11,6 ± 0,3 ^d	4801 ± 1754 ^c	15113 ± 774 ^c	2087 ± 509 ^a	694 ± 53 ^a	6 ± 0,0 ^a

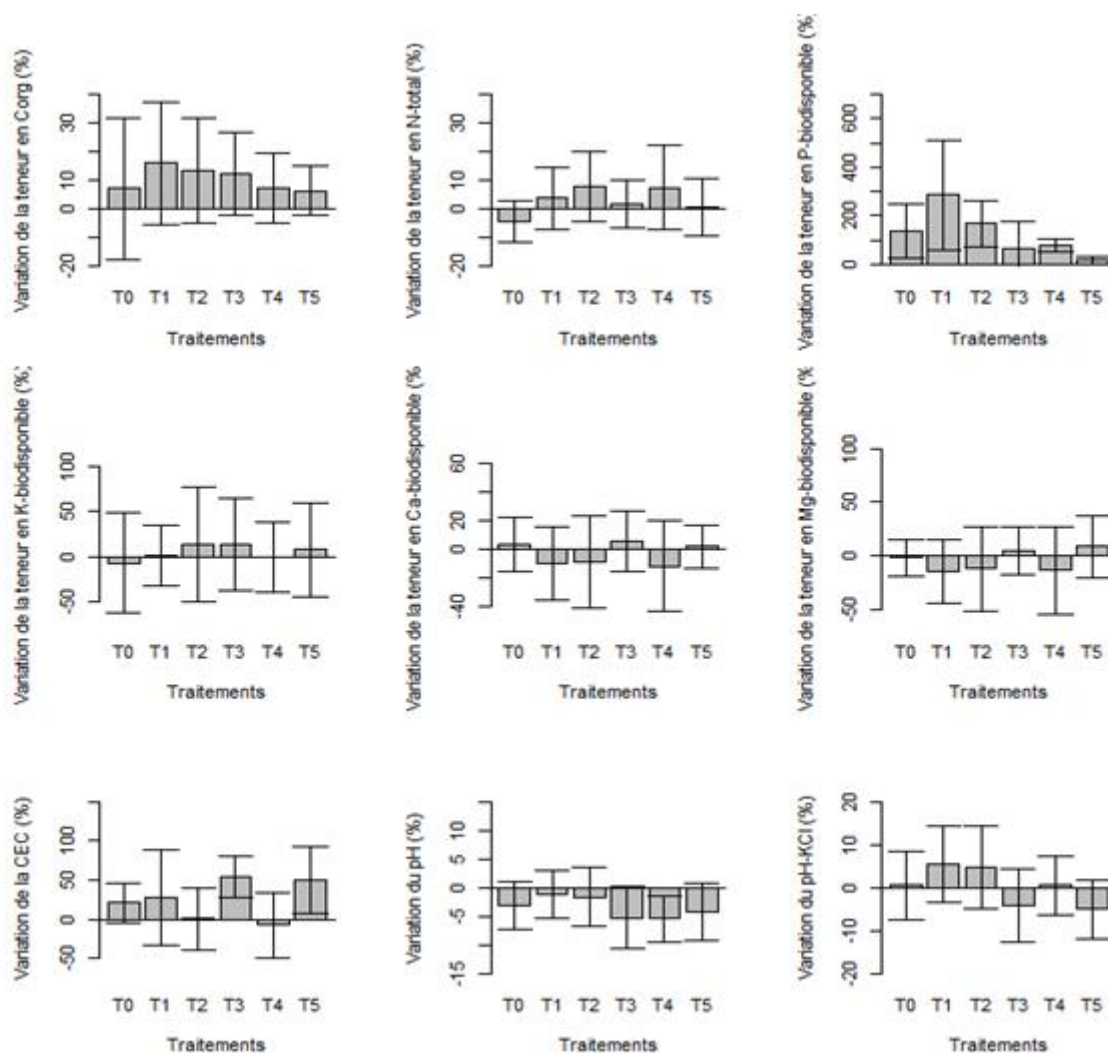
Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5 %.

Selon le test de Fisher ; les valeurs précédées du signe ± représentent les écarts types, nombre de répétitions = 3.

EVOLUTION DES PARAMETRES CHIMIQUES DU SOL

La figure 1 résume la variation des paramètres chimiques du sol après une campagne d'utilisation du biochar. Les résultats obtenus montrent qu'après une campagne d'utilisation du biochar, les paramètres chimiques du sol (pH, CEC, N-total, P biodisponible, K biodisponible, Ca²⁺ échangeable et Mg²⁺ échangeable) ont connu des variations mitigées (figure 1). Exception faite du carbone, du phosphore et du pH-eau, où des tendances nettes se dessinent, des variations positives et négatives ont été observées pour le même paramètre par rapport aux différents traitements sans toutefois être significatives. Seules les variations de la teneur en phosphore et la CEC ont été significativement

affectées par les traitements appliqués ($p=0,0251$ et $0,0222$ respectivement), avec des variations positives allant de 18 à 285 % (Figure 1-c) et de 7 à 16 % (Figure 1-g) respectivement. La teneur en phosphore du sol était plus élevée avec traitement T1, tandis que T3 a été plus performant à l'augmentation de la CEC (figure 1-g) et a induit une amélioration de ces paramètres comparativement aux autres traitements. Comparé à la situation de référence avant l'installation de l'essai, l'apport du biochar-SRF a eu un effet positif sur la teneur en carbone organique, en azote total, en phosphore disponible, en potassium disponible et sur la CEC. L'effet de ce traitement était plus prononcé sur la teneur en phosphore et la CEC, soit 66 et 54 % d'augmentation respectivement. De façon générale, le biochar a entraîné une diminution minime du pH du sol de 0,1 à 0,2 unités.



T0:témoin; T1:biochar grande-dose; T2:Microdose; T3:Biochar-SRF; T4:Biochar petite-dose; T5:Dose vulgarisée

Figure 1 : Variation des paramètres du sol en fonction des traitements a) Carbone-organique ; b) Azote ; c) Phosphore ; d) Potassium ; e) Calcium ; f)Magnésium ; g) CEC ; h) pH-eau ; pH-KCl.

Change in soil parameters according to treatments a) Organic carbon; b) Nitrogen; c) Phosphorus; d) Potassium; e) Calcium; f) Magnesium; g) CEC; h)pH-water; i) pH-KCl.

EVOLUTION DE L'HUMIDITE DU SOL

Les apports de biochar ont eu des effets positifs et significatifs ($p = 0,00015$ et $0,0415$) sur l'accroissement de l'humidité du sol aux stades 50 JAS et 71JAS du sorgho (figure 2). L'humidité du sol a augmenté de 17 et 16 % avec l'apport de 100 g de biochar/zai, respectivement au stade

montaison et floraison, comparativement au témoin. Par contre, le traitement T3 (biochar-SRF) a eu des effets similaires à T0 et T5 sur les trois stades végétatifs. Malgré l'apport en faible dose du biochar-SRF (2 g/poquet), il est intéressant de remarquer que l'humidité pondérale du sol a cru de 8 % au stade maturité (93 JAS) comparativement à T0.

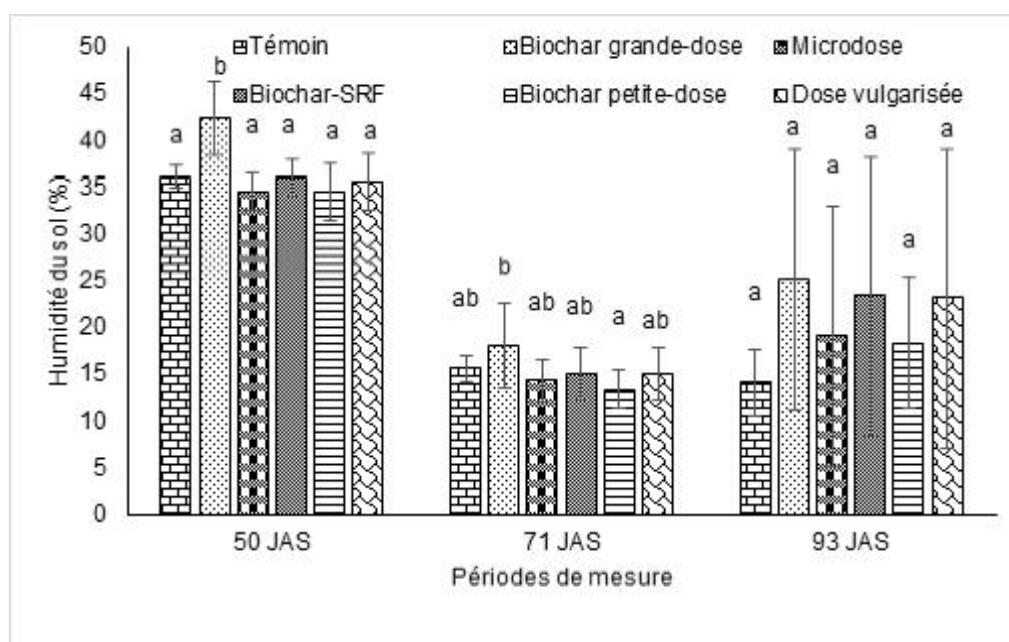


Figure 3 : Variation de l'humidité du sol des profondeurs 0-20 cm en fonction des amendements.

Variation of soil moisture from depths 0-20 cm for the different amendments.

HAUTEUR MOYENNE DES PLANTS DE SORGHO EN FONCTION DES TRAITEMENTS

La croissance globale du sorgho a été significativement affectée par les différents fumures, quels que soient le stade végétatif et la campagne de production (tableau 3). Au stade pleine floraison (60 JAS), les plants de sorgho ont été plus grands sous les traitements à base

de biochar et les plus faibles performances ont été enregistrées chez le témoin et l'application de la dose vulgarisée. La hauteur moyenne à 60 JAS est passée de 171 cm pour le témoin, à 226 cm avec le traitement T1. L'apport du biochar-SRF a induit une augmentation de la hauteur du sorgho de 29 % en 2019 et 40 % en 2020 comparativement au témoin.

Tableau 3 : Variation des hauteurs des plants de sorgho en fonction des traitements au cours des campagnes agricoles 2019 et 2020.

Sorghum's height variation by treatment in the 2019 and 2020 crop seasons.

Traitements	Campagne agricole 2019			Campagne agricole 2020		
	Hauteur (cm)			Hauteur (cm)		
	30 JAS	45 JAS	60 JAS	30 JAS	45 JAS	60 JAS
Témoin	61 ^a ± 21	131 ^a ± 47	171 ^a ± 67	74 ^a ± 10	126 ^a ± 28	161 ^a ± 49
Biochar-Grande-dose	72 ^b ± 24	168 ^c ± 47	226 ^b ± 65	79 ^c ± 11	159 ^{cd} ± 30	221 ^c ± 36
Microdose	62 ^a ± 19	152 ^{bc} ± 42	207 ^b ± 59	73 ^a ± 9	151 ^{bc} ± 24	215 ^c ± 32
Biochar-SRF	70 ^b ± 21	165 ^c ± 47	221 ^b ± 59	78 ^{bc} ± 11	163 ^d ± 25	226 ^c ± 38
Biochar-Petite-dose	72 ^b ± 22	165 ^c ± 50	211 ^b ± 71	75 ^{ab} ± 10	154 ^{cd} ± 25	215 ^c ± 40
Dose vulgarisée	65 ^{ab} ± 15	142 ^{ab} ± 34	178 ^a ± 53	76 ^{bc} ± 11	141 ^b ± 28	199 ^b ± 41

Les valeurs suivies de la même lettre dans chaque colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5 %.. Selon le test de Fisher ~ les valeurs précédées du signe ± représentent les écarts types, nombre de répétitions = 4.

RENDEMENTS MOYENS ET LE POIDS DE MILLE GRAINS DU SORGHO

Le tableau 4 présente les rendements grains et paille, et le poids de mille grains du sorgho en fonction des traitements au cours des campagnes agricoles 2019 et 2020. Les résultats montrent que les rendements du sorgho ont été significativement affectés par les différents régimes de fertilisation appliqués au cours des deux campagnes agricoles ($P_{\text{paille}} = 0,02$ & $0,01$ et $P_{\text{grain}} = 0,013$ & $0,014$ respectivement pour 2019 et 2020). En 2019, les rendements en grains ont été plus élevés avec les traitements biochar grande-dose et biochar-SRF comparativement au témoin, soit un surplus de production de 904 et 773 kg/ha respectivement. Au cours de la campagne 2020, les meilleurs rendements en grains ont été obtenus avec les traitements biochar-SRF et biochar grande-dose, soit respectivement 1986 ± 391 kg/ha et 1934 ± 418 kg/ha, et le plus faible par le traitement T0, soit 1074 ± 595 kg/ha. Cela représente un gain de 912 et 860 kg/ha respectivement avec le biochar grande-dose et le biochar-SRF.

Pour ce qui est de la production en paille en

2019, les meilleurs rendements se rencontrent au niveau du *zaï* traité au biochar grande-dose (T1), soit une augmentation de 109 % par rapport au témoin. La production en paille sous traitement *zaï* + biochar-SRF (T3) était de 1,8 et 1,2 fois plus élevée que les traitements témoin (T0) et pratique vulgarisée (T5) respectivement. Des tendances similaires ont été observées sur la production en paille en 2020 ; avec 4965 ± 878 kg/ha pour T1 et 4257 ± 1676 kg/ha pour T3, contre 2444 ± 1509 kg/ha pour T0 soit respectivement 2 et 1,7 fois plus élevé que le témoin. Globalement, le sorgho a eu une meilleure réponse au biochar-SRF en 2020 qu'en 2019, avec un rendement grain moyen allant de 1699 ± 687 kg/ha en 2019 à 1986 ± 391 kg/ha en 2020, soit un accroissement de 17 %. De même, les résultats obtenus montrent que le biochar-SRF a produit plus de grains, comparativement à l'adjonction du biochar (T1 et T4) à l'engrais minéral en apport microdose; même si les variations observées sont minimes.

Le poids moyen de mille grains de sorgho a varié de 21 à 24 g au cours des deux campagnes. Les traitements appliqués ont eu des effets similaires sur le remplissage des grains ($p = 0,226$ & $0,266$ respectivement pour 2019 et 2020).

Tableau 4 : Rendements moyens et poids de mille grains de sorgho en fonction des traitements.

Average yields of sorghum and weight of thousand grain according to treatments.

Traitements	Campagne agricole 2019			Campagne agricole 2020		
	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)	Poids de mille grains (g)	Rendement grain (kg/ha)	Rendement paille (kg/ha)	Poids de mille grains (g)
Témoin	$926^a \pm 285$	$2220^a \pm 1629$	$22^a \pm 2,2$	$1074^a \pm 595$	$2444^a \pm 1509$	$22^a \pm 1,3$
Biochar-Grande-dose	$1830^b \pm 267$	$4647^c \pm 1640$	$22^a \pm 2,5$	$1934^b \pm 418$	$4965^b \pm 878$	$23^a \pm 1,2$
Microdose	$1539^{ab} \pm 548$	$4470^{bc} \pm 2875$	$24^a \pm 1,1$	$1549^{ab} \pm 327$	$3916^{ab} \pm 1549$	$22^a \pm 0,6$
Biochar-SRF	$1699^b \pm 687$	$4091^b \pm 2512$	$23^a \pm 0,7$	$1986^b \pm 391$	$4257^{ab} \pm 1676$	$21 \pm 0,8$
Biochar-Petite-dose	$1403^{ab} \pm 206$	$4143^b \pm 1466$	$23^a \pm 1,7$	$1735^{ab} \pm 350$	$4478^b \pm 1333$	$22^a \pm 1,4$
Dose vulgarisée	$1547^{ab} \pm 319$	$3554^{ab} \pm 1955$	$23^a \pm 1,2$	$1566^{ab} \pm 551$	$3431^{ab} \pm 981$	$22^a \pm 0,8$

DISCUSSION

EFFET DU BIOCHAR SUR L'EVOLUTION DES PARAMETRES CHIMIQUES DU SOL

L'apport des fertilisants a eu des réponses variables sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol. En effet, les traitements au biochar ont eu un impact positif sur le carbone organique, l'azote total et le phosphore biodisponible (Figure 1). L'augmentation de la

teneur en carbone était plus élevée avec les traitements à base de biochar (T1, T3 et T4), comparativement au témoin et à la dose vulgarisée (T5). Cela montre l'importance du biochar dans le renforcement de la teneur du carbone et certains nutriments du sol tels que l'azote et le phosphore (Zhang *et al.*, 2016; Brassard *et al.*, 2018). Le stockage du carbone considéré comme une fonction essentielle du sol assurée par le biochar, serait principalement lié à sa stabilité chimique et son impact sur la diminution de la respiration du sol, et par

conséquent une baisse de la minéralisation de la matière organique (Ojeda *et al.*, 2015). D'après l'étude de Major *et al.* (2010), moins de 3 % du carbone des biochars sont perdus par minéralisation après deux ans d'enfouissement au sol sous le climat tropical. Parmi les traitements au biochar, la variation la plus importante a été observée avec l'apport de biochar grande-dose T1 (100 g de biochar + engrais minéraux en microdose). Ce résultat confirme la nécessité d'appliquer de grandes doses de biochar à l'état brut (biochar pristine), ou l'adjonction de doses élevées d'engrais minéraux pour espérer des effets positifs à court terme sur des sols à fort potentiel (Melaku *et al.*, 2020). Ces résultats corroborent les travaux de Lele *et al.*, (2016) qui ont obtenu une amélioration des teneurs en carbone, en phosphore et en potassium disponibles suite à l'apport de 15 t/ha du biochar associé aux engrais minéraux, dont les effets positifs ont été attribués à la forte capacité d'adsorption et de rétention de nutriments du biochar du fait de sa grande surface spécifique. Il est important de noter que malgré l'apport en faible quantité de biochar du traitement T3 (2 g/poquet), il a permis d'avoir des teneurs en éléments biodisponibles (Ca^{2+} et Mg^{2+}) nettement supérieures à la teneur initiale du sol et à l'apport de la même quantité de biochar non activé (2 g/poquet) associé aux engrais minéraux (T4). La bonne performance du biochar-SRF pourrait être principalement liée à une bonne rétention des nutriments (NH_4^+ , PO_4^{3-} , K^+ mais aussi Ca^{2+} et Mg^{2+}) durant le processus d'activation, et permettant une libération lente pour approvisionner le sol et les cultures. Le taux de relargage des nutriments depuis le biochar-SRF vers la solution du sol, est un mécanisme qui demande à être compris pour ainsi maximiser le potentiel de libération lente des nutriments aux moments opportuns, eu égard aux stades de développement du sorgho. Cela permet de maximiser la biodisponibilité des nutriments pour la culture, tout en minimisant les pertes de ces éléments par lixiviation et/ou lessivage (Agyarko-Mintah *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2020). Le relargage progressif des nutriments permet de réduire les consommations de luxe.

Contrairement aux résultats produits dans les travaux de Gwenzi *et al.* (2018), Pandit *et al.* (2018), l'incorporation du biochar a engendré une baisse du pH du sol de 1,2 à 6 %. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la déprotonation de groupements carboxyliques du biochar ont

contribué à acidifier légèrement la solution du sol à un niveau plus élevé que l'effet alcalinisant que les sels basiques du biochar auraient pu avoir. L'arrêt de la pyrolyse effectué à l'eau courante, pourrait expliquer la perte d'une partie de sels basiques qui auraient pu contribuer à l'alcalinisation du sol. Cet effet pourrait également provenir de l'adjonction des engrais minéraux, qui constituent une source potentielle d'ions acidifiants via le processus de nitrification qui contribue à acidifier la solution du sol, en produisant 2H^+ par molécule de NH_4^+ oxydée en NO_3^- produite. En effet, il a été montré que l'activation du biochar avec des substances acidifiantes ou le NPK diminuerait son pH de 0,2 à 3 unités selon sa concentration (Ahmad *et al.*, 2018; Panwar & Pawar, 2020). Le même phénomène est observé avec l'utilisation du biochar de balle de riz produit à faible température sur des sols acides, où l'incorporation du biochar sur des sols sableux à pH élevé a engendré une diminution du pH étant donné l'oxydation des groupements fonctionnels du biochar (Shetty & Prakash, 2020).

EFFET DU BIOCHAR SUR L'HUMIDITE DU SOL

Le maintien de l'humidité du sol est un facteur crucial pour la productivité des cultures surtout en milieu aride. Elle conditionne fortement l'absorption et le transport des nutriments par les plantes, ce qui affecte le rendement des cultures. Considérant les résultats obtenus, l'augmentation de l'humidité du sol suite à l'apport de biochar grande-dose (100 g biochar/zaï) comparativement à la pratique paysanne (100 g compost/zaï), pourrait s'expliquer par une amélioration de la porosité globale du sol, le biochar étant lui-même très poreux et caractérisé par une grande surface spécifique (Blanco-Canqui, 2017). En rappel, les analyses initiales du biochar utilisé avait donné une valeur de la porosité égale à 70 kg/m^3 de biochar. Ces résultats corroborent les travaux de Ojeda *et al.* (2015), selon lesquels l'ajout du biochar au sol modifie l'humidité du sol par l'augmentation de la dynamique de rétention en eau. En effet, la caractérisation initiale du biochar utilisé avait révélé une capacité de rétention d'eau de 336%. Son incorporation au sol permettrait donc d'accroître le niveau de stockage d'eau, et de fait prolonger sa capacité à fournir de l'eau aux plantes pendant les périodes de sécheresse (Uzoma *et al.*, 2011; Duong *et al.*, 2017). Les travaux de Pandit *et al.*, (2018) et Razzaghi *et*

al., (2020) ont abouti à une augmentation de l'humidité de sol de 7 à 51 % de leur capacité au champ, suite à l'incorporation de 2 % de biochar dans un sol à texture grossière. Pour Basso *et al.* (2013), l'amélioration de l'humidité du sol pourrait être liée aussi à la réduction des pertes d'eau par évaporation ou probablement à une augmentation de la capacité d'absorption de l'eau (WUE) dans les parcelles traitées au biochar. Cette hypothèse est confirmée par les travaux de Hagemann *et al.* (2017), qui ont mis en évidence la présence de revêtements organiques sur la surface du biochar activé. Ces revêtements pourraient être impliqués dans l'amélioration de l'humidité du sol, grâce à la réduction des volumes poraux et/ou par l'amélioration des propriétés hydrophiles du sol. L'application de dose élevée de biochar (T1) dans le *zaï* a été globalement plus avantageuse dans la conservation de l'humidité du sol par rapport à l'enfouissement de petite quantité au poquet (2 g). Dans le contexte de changement climatique, cet aspect revêt toute son importance étant donné la grande variabilité de la quantité des pluies et de son apport très hétérogène au cours de la saison humide (Ibrahim, 2012). Dans ces régions arides où le taux d'évapotranspiration est généralement élevé pendant la saison de croissance, cette caractéristique du biochar peut aider les plantes à utiliser l'eau le plus efficacement possible et être une solution permettant de contribuer à résister au stress hydrique. De plus, elle pourrait aussi aider les cultures à mieux supporter les épisodes de sécheresse, et par conséquent à rendre une production végétale possible dans les zones très arides où elle n'aurait aucune chance de réussir dans les conditions normales.

IMPACT DE L'APPORT DU BIOCHAR SUR LA HAUTEUR MOYENNE ET LES RENDEMENTS DU SORGHO

En 2019, les rendements en grains ont été plus élevés avec les traitements biochar grande-dose et biochar-SRF comparativement au témoin, soit un surplus production de 904 et 773 kg/ha. En comparant le rendement sous le traitement biochar-SRF au témoin et à la dose vulgarisée, l'accroissement du rendement était de 84 et 10 % en 2019, et de 85 et 27 % en 2020. Ce résultat est très important au regard du fait que les rendements moyens en milieu paysan sont faibles et n'excèdent pas 800 kg/ha sur les types de sols considérés (Sissoko et Lebailly, 2019). De même, la quantité de paille produite sous le

traitement *zaï* + biochar-SRF est 1,8 à 1,2 fois plus élevée que les traitements témoin (T0) et pratique vulgarisée (T5) respectivement. Cette performance peut bien être exploitée au plan économique, car la paille a une valeur monétaire élevée en début d'hivernage, mais elle constitue aussi un potentiel pour la restauration de la fertilité des sols par le biais du compostage ou paillage.

Ces meilleures performances du biochar-SRF malgré une faible allocation en nutriments contrairement aux traitements conventionnels d'apport de NPK (tableau 2), pourraient être attribuées d'une part à l'amélioration des caractéristiques chimiques du sol, et d'autre part au comportement de libération lente des nutriments (Dietrich *et al.*, 2020; Shi *et al.*, 2020). Il est connu des engrais SRF leur capacité à améliorer les rendements culturaux (Lélé *et al.*, 2016) du fait de la libération lente des nutriments, qui permet la limitation des pertes surtout des formes azotées (Sigua *et al.*, 2016) et l'amélioration de l'efficacité d'utilisation grâce à la synchronisation de la libération et des demandes des cultures (AISHamaileh *et al.*, 2018). Selon Yu *et al.*, (2019), l'amélioration de la croissance des plantes peut être attribuée à une bonne fourniture de nutriments par le biochar, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments, et la création d'un environnement favorable au niveau de la rhizosphère. Les travaux de Gwenzi *et al.* (2018) ont montré que le comportement de libération lente fonctionne bien avec les engrais SRF issus de la macération du biochar avec un taux de relargage du NO_3^- , du K^+ et du P-PO_4^{3-} inférieur à celui d'un engrais chimique conventionnel. Ce mécanisme limite les pertes et facilite une meilleure absorption des nutriments par les racines des plantes, assurant ainsi une bonne croissance et l'amélioration des rendements du sorgho. Les effets positifs du biochar ont conduit à une nette amélioration de la CEC, ce qui s'est traduit par un rendement plus important (tableau 4). L'amélioration du statut nutritionnel du sol a probablement eu un effet positif sur le tallage du sorgho, le nombre et la taille des épis, ce qui expliquerait la différence de rendement observée en dépit du fait que le remplissage de grains soit homogène pour l'ensemble des traitements. Outre l'amélioration de la capacité d'échange cationique, les gains supplémentaires obtenus avec les traitements au biochar peuvent s'expliquer aussi par l'amélioration de l'humidité du sol (Pandit *et al.*, 2018). L'augmentation de

l'humidité du sol pourrait avoir permis aux plants de mieux résister pendant les périodes de sécheresse. Des travaux de Chen *et al.* (2018) sur l'utilisation du biochar enrichi au NPK, ont permis d'améliorer le rendement du maïs de 20 % au Népal. Globalement, les rendements ont été plus élevés en 2020 qu'en 2019 ; le surplus de rendements engrangé en 2020 a varié de 104 à 332 kg/ha pour les traitements à base de biochar, contre 10 à 19 kg/ha pour les pratiques conventionnelles. Cette bonne performance serait attribuable à la meilleure pluviosité enregistrée, ou probablement à l'effet bonifiant du biochar au cours du temps (He *et al.*, 2020). En effet, le biochar a une réponse plus lente à la minéralisation que les amendements organiques classiques ; par conséquent, il permet de mieux conserver des reliquats de nutriments des campagnes antérieures pour la culture suivante (Melaku *et al.*, 2020). Cette performance du SRF confirme les travaux de Dietrich *et al.* (2020) selon lesquels, l'activation du biochar crée des groupes fonctionnels fortement mobilisés dans la régulation de la mobilité des nutriments dans la solution du sol, ce qui n'est pas le cas lors d'une simple adjonction du biochar aux engrais minéraux. Nous démontrons ainsi le bénéfice majeur de l'activation du biochar avec le NPK préalablement à son apport au sol via amendement.

CONCLUSION

Cette étude a été conduite afin d'évaluer l'efficacité du biochar-SRF pour la restauration des sols dégradés et la production du sorgho dans un système *zaï* en zone de climat semi-aride. Le suivi des composantes de rendement du sorgho a montré que l'apport du biochar associé à la pratique du *zaï*, permet de restaurer le potentiel productif d'un sol dégradé. La restauration des sols se traduit par l'amélioration de l'humidité du sol de 36 à 42 %, et la disponibilité en éléments nutritifs ($P-PO_4^{3-}$ et K^+). L'amélioration des conditions hydriques et chimiques du sol a permis de doubler les rendements du sorgho par rapport à la pratique paysanne, allant de 926 à 1830 kg/ha avec l'application du biochar. La comparaison des traitements à base du biochar a révélé que l'activation du biochar crée une plus-value grâce au mécanisme de libération lente des nutriments. Cette étude suggère qu'à défaut d'activation, le biochar doit être apporté à des doses élevées au moins 3 t/ha/an, en

combinaison avec des engrais minéraux pour espérer une réponse à court terme.

Au regard des résultats obtenus, l'utilisation du biochar activé et apporté en faible dose pourrait constituer un moyen d'accroître durablement la production agricole, et de restaurer la fertilité des sols dans les régions semi-arides, hypothèse faite que la biomasse puisse être disponible pour un taux d'amendement de 3 t/ha/an. Compte tenu de la réduction progressive des superficies emblavées pour la production de coton, il serait intéressant de tester l'efficacité de biomasses disponibles localement comme les gousses de *Piliostigma* afin de faciliter l'adoption de la technologie par les producteurs.

REFERENCES

- Agyarko-Mintah, E., Cowie, A., Singh, B. P., Joseph, S., Van Zwieten, L., Cowie, A., Harden, S., & Smillie, R. (2017). Biochar increases nitrogen retention and lowers greenhouse gas emissions when added to composting poultry litter. In *Waste Management* (Vol. 61). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.027>
- Ahmad, M., Usman, A. R. A., Al-faraj, A. S., Ahmad, M., Sallam, A., & Al-wabel, M. I. (2018). Chemosphere Phosphorus-loaded biochar changes soil heavy metals availability and uptake potential of maize (*Zea mays* L.) plants. *Chemosphere*, 194, 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.156>
- Ali, K., Arif, M., Badshah, I., & Zafar, H. (2018). Formulation of biochar based fertilizer for improving maize productivity and soil fertility. *Pakistan Journal of Botany*, February.
- AlShamaileh, E., Al-Rawajfeh, A. E., & Alrbaihat, M. (2018). Mechanochemical Synthesis of Slow-release Fertilizers: A Review. *The Open Agriculture Journal*, 12(1), 11–19. <https://doi.org/10.1007/s00066-018-1310-6>
- Barro, A., Zougmore, R. B., Maraux, F., & Dugué, P. (2007). Etude de cas sur la récupération des sols dégradés dans le plateau central du Burkina Faso : un chemin vers une agriculture durable; a path towards sustainable agriculture. *AIDA Conference, Agricultural Innovation in Dryland Africa, Accra, Ghana, 22-24 January 2007 / CIRAD, FARA, CTA. - s.l. : S.n., 2007, 6.*
- Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R., & Westgate, M. (2013). Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy*,

- 5(2), 132–143. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12026>
- Bayen, P., Traoré, S., Bognounou, F., Kaiser, D., Thiombiano, A. (2011). Effet du zaï amélioré sur la productivité du sorgho en zone sahélienne. *VertigO la revue électronique en sciences de l'environnement*. Volume 11 Numéro 3 (décembre 2011).
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4). <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- Brassard, P., Godbout, S., Palacios, J. H., Jeanne, T., Hogue, R., Dubé, P., Limousy, L., & Raghavan, V. (2018). Effect of six engineered biochars on GHG emissions from two agricultural soils: A short-term incubation study. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.022>
- Caria, G., Proix, N., Ciesielski, H., (2007). Dosage du carbone organique par combustion sèche après décarbonatation automatisée des sols. Actes des 8èmes Journées de la fertilisation raisonnées et de l'analyse de terre. GEMAS-COMIFER - INRA – Laboratoire d'analyses des sols, 8p.
- Chen, L., Chen, Q., Rao, P., Yan, L., Shakib, A., & Shen, G. (2018). Formulating and optimizing a novel biochar-based fertilizer for simultaneous slow-release of nitrogen and immobilization of cadmium. *Sustainability (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082740>
- Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B. H., Sparrevik, M., & Schmidt, H. P. (2016). Emissions and char quality of flame-curtain «Kon Tiki» kilns for farmer-scale charcoal/biochar production. *PLoS ONE*, 11(5), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>
- Cui, Y. F., Meng, J., Wang, Q. xiang, Zhang, W. ming, Cheng, X. yi, & Chen, W. fu. (2017). Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(5), 1064–1074. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61578-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61578-2)
- Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu, N., Djamen, P., Douzet, J. M., & Tittonell, P. (2016). Soil variability and crop yield gaps in two village landscapes of Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 105(3), 199–216. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9705-6>
- Dietrich, C. C., Rahaman, A., Robles-aguilar, A. A., Latif, S., Intani, K., Müller, J., & Jablonowski, N. D. (2020). *Nutrient Loaded Biochar Doubled Biomass Production in Juvenile Maize Plants (Zea mays L.)*. 1-12.
- Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L., & Zheng, B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 36, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
- Duong, V. T., Khanh, N. M., Nguyen, N. T. H., Phi, N. N., Duc, N. T., & Xo, D. H. (2017). Impact of biochar on the water holding capacity and moisture of basalt and grey soil. *Journal of Science Ho Chi Minh City Open University*, 7(2), 36-43.
- Fournier J., Bonnot-Courtois C., Paris R., Voldoire O., Le Vot M., 2012. Analyses granulométriques, principes et méthodes. CNRS, Dinard, 100 p.
- Gaskin, G., and J. Miller, 1996 : Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *Journal of Agricultural Engineering Resources*, pp. 153-160
- Gwenzi, W., Nyambishi, T. J., Chaukura, N., & Mapope, N. (2018). Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–K slow-release fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2), 405–414. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1399-7>
- Hagemann, N., Joseph, S., Schmidt, H. P., Kammann, C. I., Harter, J., Borch, T., Young, R. B., Varga, K., Taherymoosavi, S., Elliott, K. W., McKenna, A., Albu, M., Mayrhofer, C., Obst, M., Conte, P., Dieguez-Alonso, A., Orsetti, S., Subdiaga, E., Behrens, S., & Kappler, A. (2017). Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01123-0>
- Hayashi, K., Abdoulaye, T., Gerard, B., Bationo, A. (2008). Evaluation of application timing in fertilizer microdosing technology on millet production in Niger, West Africa. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 80: 257. [Doi:10.1007/s10705-007-9141-3](https://doi.org/10.1007/s10705-007-9141-3)
- He, L., Zhao, J., Yang, S., Zhou, H., Wang, S., Zhao, X., & Xing, G. (2020). Successive biochar amendment improves soil productivity and aggregate microstructure of a red soil in a five-year wheat-millet rotation pot trial. *Geoderma*, 376(July), 114570. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114570>
- Ibrahim, B. (2012). Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un con-

- texte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Hydrologie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. Français. NNT : 2012PA066087
- INERA/Cirad, (2001). Fiche technique du sorgho Kapelga. 2p
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., Van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
- Kaho, F., Yemefack, M., Feujio, P. T. et Tchanchaouang J.C. (2011). Effet combiné des feuilles de *Tithonia diversifolia* et des engrais inorganiques sur les rendements du maïs et les propriétés d'un sol ferrallitique au Centre Cameroun. *Tropicultura*. 29, 1, p : 39-45.
- Lakanen, E., Erviö, R. (1971). A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils. *Acta Agrar Fenn* 123:223-232
- Lele, N. B., Kachaka, C., & Lejoly, S. jean. (2016). Effet de l'application d'engrais minéral complet NPK et de biochar sur les performances de la culture pure du manioc et de l'association manioc-maïs dans les conditions du plateau des Baketé en République Démocratique du Congo (RDC). *Tropicultura*, 34(1), 47-55.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J. and Lehmann J., (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*, 333:117-128 Doi 10.1007/s11104-010-0327-0
- Melaku, T., Ambaw, G., Nigussie, A., Woldekirstos, A. N., Bekele, E., & Ahmed, M. (2020). Short-term application of biochar increases the amount of fertilizer required to obtain potential yield and reduces marginal agronomic efficiency in high phosphorus-fixing soils. *Biochar*, 2(4), 503–511. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00059-x>
- Ojeda, G., Mattana, S., Àvila, A., Alcañiz, J. M., Volkman, M., & Bachmann, J. (2015). Are soil-water functions affected by biochar application? *Geoderma*, 249–250, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.02.014>
- Pandit, N. R., Mulder, J., Hale, S. E., Martinsen, V., Schmidt, H. P., & Cornelissen, G. (2018). Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. *Science of the Total Environment*, 625, 1380–1389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.022>
- Pansu M. et Gautheyrou J., 2003: Handbook of Soil Analysis Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer-Verlag , Berlin Heidelberg New York, 993 p
- Panwar, N. L., & Pawar, A. (2020). Influence of activation conditions on the physicochemical properties of activated biochar: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00870-3>
- Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361(November 2019), 114055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>
- Roose, E., Kabore, V., & GUENAT, C. (1993). Le zaï:Fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso) Éric. *Cah. Orstom, Sér. Pédol., Vol. XXVIIJ, Ilo 2, 1993: 159-173, XXVII(1), 159-173.*
- Schmidt, H. P., Pandit, B. H., Cornelissen, G., & Kammann, C. I. (2017). Biochar-Based Fertilization with Liquid Nutrient Enrichment: 21 Field Trials Covering 13 Crop Species in Nepal. *Land Degradation and Development*, 28(8), 2324-2342. <https://doi.org/10.1002/ldr.2761>
- Shetty, R., & Prakash, N. B. (2020). Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. *Scientific Reports*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69262-x>
- Shi, W., Ju, Y., Bian, R., Li, L., Joseph, S., Mitchell, D. R. G., Munroe, P., Taherymoosavi, S., & Pan, G. (2020). Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*, 701, 134424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134424>
- Sigua, G. C., Novak, J. M., Watts, D. W., Johnson, M. G., & Spokas, K. (2016). Efficacies of designer biochars in improving biomass and nutrient uptake of winter wheat grown in a hard setting subsoil layer. *Chemosphere*, 142, 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.015>
- Sissoko, P., Lebailly, P. (2019). Les déterminants des rendements du mil et du sorgho avec la technique du microdosage d'engrais. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* (2019) 7 (2): 213-

- 222
- Metson, A.J. 1956. *Methods of Chemical Analysis for Soil Survey Samples.*, Bulletin 1. Wellington
- Trenkel, M. E. (2010). Slow and controlled-Release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Troy, B., et Picaud, C. (2013). Mieux gérer l'eau par des pratiques agricoles innovantes : quelles perspectives dans les pays en développement. FARM - Note n° 6 - Mars 2013
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. <https://doi.org/10.5530/pj.2018.1.27>
- Verheijen, F. G. A., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-hur, M., & Jacob, J. (2019). The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, 347(April), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.044>
- Wang, R., Zhang, Y., Cerdà, A., Cao, M., Zhang, Y., Yin, J., Jiang, Y., & Chen, L. (2017). Changes in soil chemical properties as affected by pyrogenic organic matter amendment with different intensity and frequency. *Geoderma*, 289, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.006>
- Yaméogo, J., Somé, A., Lykke, A., Hien, M., & Nacro, H. (2013). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et des cordons pierreux à l'Ouest du Burkina Faso. *Tropicultura*, 31(4), 224-230.