

# Effets des fertilisants au biochar et du type de sol sur l'évolution des rendements et la fertilité des sols dans les systèmes coton-maïs de l'Ouest du Burkina Faso

---

**Titre courant** : Effets de la fertilisation à base de biochar sur les paramètres agronomiques à l'ouest du Burkina Faso

**Fatimata SABA<sup>1\*</sup>, Hamado SAWADOGO<sup>2</sup>, Drissa Cisse<sup>3</sup>,  
Arzouma Alimata BANDAOGO<sup>1</sup>, Kalifa COULIBALY<sup>4</sup>,  
Jean-Thomas CORNELIS<sup>5</sup>, Hassan Bismarck NACRO<sup>4</sup>**

## Résumé

La baisse de la fertilité des sols combinée aux faibles restitutions organiques des exportations sont à l'origine des baisses de rendement dans la zone cotonnière du Burkina Faso. Les fertilisants issus de l'activation du biochar, sous-produit de la pyrolyse de tiges de cotonnier, ont été comparés à la microdose et la pratique vulgarisée des engrais NPK et urée lors d'une expérimentation en milieu paysan à l'ouest du Burkina Faso. Un dispositif en bloc randomisé a été installé chez deux producteurs-expérimentateurs pratiquant la rotation coton-maïs. Chaque producteur représentait un type de sol donné. Les traitements comparés étaient composés de : la pratique vulgarisée (T1), la microdose (T2) et l'apport du biochar *Slow Release Fertilizer* (biochar-SRF) (T3) répétés quatre (04) fois chez chaque producteur. L'efficacité des traitements a été déterminée sur les paramètres agronomiques et pédologiques. Les meilleurs croissances et rendements moyens ont été observés avec

---

<sup>1</sup> Institut de l'environnement et de Recherches Agricoles (INERA /CNRST) /Programme Gestion des ressources naturelles et systèmes de production, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

<sup>2</sup> Institut de l'environnement et de Recherches Agricoles (INERA/CNRST) /département Gestion des ressources naturelles et systèmes de production, Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>3</sup> Université Nazi Boni/ Centre universitaire de Gaoua, Gaoua, Burkina Faso

<sup>4</sup> Université Nazi Boni/Institut du développement rural, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

<sup>5</sup> Faculty of Land and Food Systems, The University of British Columbia, Vancouver, Canada

\*Auteur correspondant : Fatimata SABA, [fati.saba@yahoo.fr](mailto:fati.saba@yahoo.fr), Tel : + 226 75 44 69 11 ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8001-0034>

DOI : <https://doi.org/10.64707/revstsna.v44i1.1781>

les parcelles ayant reçu du biochar-SRF et la microdose. En 2020, l'application du biochar-SRF a engendré un surplus 113 kg de coton graine par rapport à la dose vulgarisée ; passant de 1616 kg/ha pour la dose vulgarisée à 1729 kg/ha pour le biochar-SRF. De même, l'apport du biochar-SRF a induit une augmentation des paramètres du sol tels que la CEC, la teneur en matière organique (MO) et pH impactant ainsi positivement la fertilité globale du sol avec un effet prononcé sur le sol ferrugineux lessivé à taches et concrétions. Par conséquent, le biochar-SRF peut être vulgarisé comme une alternative durable à la fertilisation minérale.

**Mots clés :** Fertilité du sol, biochar-SRF, microdose, Burkina Faso

## **Effects of biochar fertilizers and soil type on yield trends and soil fertility in cotton-maize systems in western Burkina Faso.**

### **Abstract**

In Burkina Faso, low soil fertility combined with low organic matter supply explained yield decline in the cotton cultivation areas of Burkina Faso. Biochar based slow-release fertilizer (biochar-SRF), a by-product of cotton stalk pyrolysis, were compared to microdosing of mineral fertilizer of NPK and urea and farmers practice which combined 2,5 t of compost to recommended rate of NPK and urea in an on-farm experiment in western Burkina Faso. A randomized block design was established during three rainy seasons on the farms of two farmers practicing cotton-corn rotation. Each farmer represented a soil type. Comparative treatments included: conventional practice (T1), microdosing (T2) and biochar-SRF (T3), each replicated four times. Treatments' performance was assessed on agronomic and soil parameters (plants growth, yield, soil exchangeable capacity, pH, N, P, K). The highest plant growth rates and crops yield were observed with biochar-SRF and microdose treatments. Beneficial effects of the biochar-SRF fertilizer were observed on soil parameters such as soil exchangeable capacity, organic matter, and pH, which lead to positive impact on overall soil fertility, with a pronounced effect on ferruginous concretions soil type. This suggests that biochar-based fertilization can be promoted as a sustainable alternative to conventional practice.

**Keywords:** Soil fertility, biochar-SRF, microdosing, Burkina Faso.

### **Introduction**

Dans la zone ouest du Burkina Faso, les agroécosystèmes sont dominés par la rotation coton-maïs. Ce système de production joue un rôle important dans l'atteinte de la sécurité alimentaire et la constitution de ressources financières des exploitations agricoles. Ce dynamisme jadis fondé sur des conditions pédoclimatiques favorables de la région, subit une baisse de performance du fait des pratiques agricoles inappropriées et les effets du changement climatique. En effet, l'exploitation continue

des terres agricoles avec ou sans restitutions organiques et des régimes de fertilisation atypiques entraîne une diminution progressive du potentiel productif des sols (BLANCHARD et al., 2017 ; POUYA et al., 2020). Dans la zone ouest, les pratiques de gestion de la fertilité des sols sont principalement axées sur l'amendement des sols à base de résidus agricoles recyclés et l'utilisation d'engrais minéraux (NPK et urée) Cependant, la plupart des régimes organo-minéraux identifiés (fumier, compost, résidus culturaux, etc.) est en deçà de la dose recommandée et peu adapté au type de sol (POUYA et al., 2013; BLANCHARD et al., 2017). Parmi les raisons du non-respect des doses recommandées figurent la faible disponibilité de la biomasse au regard de la faible productivité des cultures et les usages alternatifs de cette dernière (énergie, construction, alimentation de bétail, etc.). Outre les apports insuffisants, les amendements organiques se minéralisent assez rapidement sous le climat tropical sec, nécessitant, de ce fait, des apports de quantités énormes et/ou le renouvellement constant des apports pour espérer l'établissement de la fertilité des sols (ANDREN et al., 2007). De même, la pratique d'une fertilisation minérale adéquate est peu envisageable dans la zone cotonnière où une bonne partie des engrais destinés à la production du coton est très souvent utilisée dans la production céréalière notamment le maïs (GUENOT & HUCHET-BOURDON, 2014). L'ensemble des facteurs précédemment cités rend difficile toute possibilité de gestion durable de la fertilité des sols et impose de tester des ressources alternatives qui puissent à la fois rehausser les caractéristiques physico-chimiques des sols tout en optimisant les apports d'engrais minéraux et l'eau à la parcelle.

Le biochar un sous-produit de la pyrolyse de la biomasse sous limitation oxygène et riche en carbone stable (CORNELISSEN et al., 2016) qui pourrait jouer un rôle capital dans la reconstitution de la fertilité des sols dégradés. Dans le bassin cotonnier du Burkina Faso, la production de coton génère chaque année d'immenses quantités de tiges de cotonnier, généralement brûlées sur place pour libérer les champs pour la saison suivante. Cette biomasse peut être mobilisée dans la production du biochar. Dans les zones arides, les amendements au biochar présentent des effets plus prononcés sur le rendement des cultures et les paramètres du sol du fait de son effet chaulant, sa forte capacité de rétention d'eau et des nutriments (JEFFERY et al., 2017; SABA et al., 2022b) et sa résistance la minéralisation rapide comparativement aux amendements classiques tels que le compost et le

fumier (KIMETU et LEHMANN, 2010). Spécifiquement, l'application du biochar au sol permet d'augmenter la disponibilité des nutriments au profit des plantes et l'efficacité d'utilisation de l'azote en limitant les différentes formes de pertes ou à travers la correction du pH permettant de rendre accessible les éléments fortement retenus comme le phosphore (DING et al., 2016; GWENZI et al., 2018; SABA et al., 2022 a).

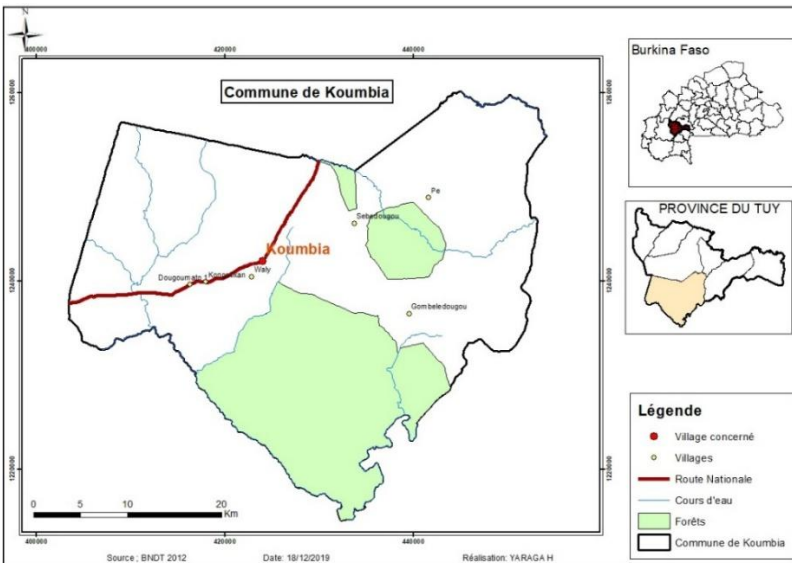
Les résultats des travaux antérieurs sur les effets de l'application des fertilisants à base de biochar ont eu des tendances mitigées. Les résultats obtenus varient en fonction du type de climat, de sol, de la culture utilisée et du type de biochar (biomasse, température) et vont de légèrement négatifs à très positifs. La moyenne des augmentations de rendement enregistrées dans les agroécosystèmes tropicaux étaient autour de 25 % (JEFFERY et al., 2017) avec pour la plupart des doses d'apport généralement supérieures à 5 t/ha. Au regard des multiples usages de la biomasse (alimentation du bétail, construction, énergie) et du faible rendement de pyrolyse (25-30%), cette quantité de biomasse nécessaire à la production du biochar serait difficilement mobilisable par les petits producteurs d'où la nécessité d'enrichir le biochar avec d'autres produits riches en éléments nutritifs afin d'accroître son efficacité à dose modérée (HAGEMANN et al., 2017; BURGEON, 2017). Parmi les facteurs affectant la réponse du biochar, les propriétés du sol jouent un rôle clé à travers l'amélioration globale du pH, la structure du sol, la capacité de rétention d'eau et la disponibilité des nutriments fortement retenus (PANDIT et al., 2018). Spécifiquement, le mécanisme de libération lente des nutriments des fertilisants au biochar dépend entièrement des conditions pédologiques et climatiques (LIU et al., 2014). D'où la nécessité d'évaluer l'efficacité des apports localisés du biochar-SRF dans une rotation triennale coton-maïs-coton sur le rendement et les paramètres physico-chimiques de deux types de sols.

## **I. Matériels et méthode**

### **I.1 Site expérimental**

La présente étude a été conduite dans la commune Koumbia (12° 42' 207" Nord et 4° 24' 010" Est), localité située à 67 km de Bobo-Dioulasso (Figure 1). Koumbia appartient au climat soudanien caractérisé par une saison humide de 6 à 7 mois (mai à octobre/novembre) et une saison sèche qui s'étend sur 5 à 6 mois (KARAMBIRI, 2018) dépendant de

l'année. Les températures moyennes oscillent entre 27 et 30°C avec des précipitations moyennes annuelles autour de 940,7 mm/an sur les 10 dernières années de l'expérimentation. Au niveau topographique, la commune est située sur une plaine à 300 m d'altitude parsemée d'affleurements rocheux et de cuirasses ferrugineux. Les sols ferrugineux sur matériaux sableux, sablo-argileux et argilo-sableux sont les plus dominants dans toute la zone (THOMBIANO ET PALLO, 1989, KAMBOU et al., 2024). Les sols agricoles sont sujets à une forte pression anthropique au regard de la forte densité de la population soit 64 habitants/km<sup>2</sup> (VALL et al., 2006; OUEDRAOGO et al., 2021) expliquant en partie la baisse de leur fertilité. Le système de production de la zone est basé sur la rotation coton-maïs et les activités pastorales. Cette rotation joue un rôle capital dans la sécurité alimentaire à travers la création de devises pour les petits producteurs et l'approvisionnement en engrais via le crédit intrant de la SOFITEX (GUENOT et HUCHET-BOURDON, 2014). La gestion de la fertilité est souvent associée à l'utilisation des amendements organiques tels que des poudrettes de parcs, du fumier et de compost dont les quantités appliquées varient en fonction de la disponibilité des ressources. Globalement, pour des raisons économiques et de faible disponibilité, les apports réels en fertilisants sont généralement inférieurs à la dose recommandée (BLANCHARD et al., 2017).



**Figure 1** : Carte de localisation du site expérimental

## I.2 Dispositif expérimental

Un dispositif en bloc randomisé comportant trois traitements dont T1 : Epannage de 2,5 t de compost/ha/an +150 kg/ha de NPK + 50 kg d'urée/ha pour le coton et 100 kg d'urée/ha pour le maïs (Dose vulgarisée) ; T2 : apport localisé de NPK et d'urée (Microdose) et T3 : apport localisé de biochar activé et d'urée (Biochar-SRF) a été mis en place durant trois saisons pluvieuses de 2018 à 2020.

La microdose a consisté à l'apport de 4 g/poquet de NPK ou biochar-SRF et de 1 g d'urée /poquet pour le coton et 2 g pour le maïs soit 125 kg/ha de NPK et 31,250 ou 62,5 kg/ha d'urée. Chaque traitement a été répété quatre (04) fois chez le même producteur. Les producteurs ont été choisis sur la base de la pratique de rotation coton-maïs, la mise en culture continue du champ pendant au moins quinze ans et le type de sol. Deux variantes de sol ferrugineux lessivé ont été choisies à l'issue de description de profils pédologiques pour y implanter les essais. Le premier groupe est constitué de sols moyennement profonds (FLIMP) avec une profondeur d'enracinement limitée par une carapace ferrugineuse à 50 cm et un second groupe à taches et concrétions (FLC) de profondeur > 120 cm. Ces sols étaient faiblement acides et peu pourvus en nutriments essentiels. Concernant les données climatiques, notons que durant la période d'expérimentation, la commune a enregistré des précipitations totales de 789,9 ; 962 et 859,9 mm d'eau en 60, 52 et 60 jours de pluie respectivement.

**Les fertilisants** étaient composés du compost provenant du recyclage d'un mélange d'herbacées, de résidus culturaux et de fumier de bovins, des engrais minéraux NPK de formulation 14-23-14 + 6S + 1B et l'urée dosant 46% N et du biochar activé (biochar-SRF). Le biochar utilisé est issu de la pyrolyse de tiges de cotonnier dans un four *Kon-Tiki* et activé par macération avec une solution de NPK (rapport volumique biochar-solution 1/0.5). La valeur fertilisante (N, P, K) et le pH moyen des fertilisants compost, du biochar-SRF et NPK est consignée dans le tableau I.

L'effet des fertilisants a été évalué sur le cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) ; variété *FK-64* et sur le maïs (*Zea mays* L.), variété *Barka*. Ce sont des variétés couramment utilisées par les producteurs. Ces deux variétés ont un potentiel de rendement de 2,8 t/ha pour le cotonnier et 5,5 t/ha pour maïs.

**Conduite de l'expérimentation :** Les opérations culturales ont été exécutées conformément aux pratiques des agriculteurs locaux. Un labour à la traction animale suivi de nivellement pour incorporer le compost a été effectué avant les semis de chaque campagne agricole. Les semis ont été réalisés aux écartements de 0,8 m sur 0,4 m puis démarriées à deux plants vigoureux par poquet avant l'application du NPK soit une densité de 31250 poquets/ha. L'entretien des cultures a consisté à deux sarclo-binages manuels suivis d'un buttage à l'application de l'urée. Les engrais ont été appliqués par épandage ou par microdose au 14<sup>ème</sup> Jour Après Semis (JAS) pour le NPK et 40<sup>ème</sup> pour l'urée. La protection contre les ravageurs du cotonnier a été assurée par l'application d'un insecticide à base de *Chlorpyrifos-ethyl* à la dose de 480 g/ha en raison de quatre traitements par campagne agricole à partir de l'apparition des boutons floraux. Quant au contrôle des chenilles légionnaires du maïs (SMITH, 1797); il a été assuré au besoin par la pulvérisation d'une solution à base de *Emamectine benzoate* dès l'apparition des premiers symptômes.

**Collecte des données :** l'efficacité des traitements appliqués a été évaluée sur les paramètres physico-chimiques du sol et agromorphologiques. Pour ce faire, des prélèvements de sol ont été effectués à la tarière sur les profondeurs 0-20 cm suivant la méthode du diagonal avant la mise en place de l'essai et à la fin de la troisième campagne. Ces échantillons ont été séchés, broyés puis soumis aux analyses pour déterminer la granulométrie des trois fractions du sol (limon, sable et argile) par la méthode de sédimentation par gravité (NF X 31-07), le pH, le C-organique, les éléments totaux et biodisponibles (N, P, K). Le pH a été déterminé par mesure directe au pH-mètre électronique dans une suspension (rapport 1/5) à l'eau distillée (pH-eau) et dans une solution de KCl (0,01M) pour le pH-KCl. Le C-org et l'azote ont été dosés par spectrométrie proche de l'infrarouge (ISO 10694) après combustion sèche flash (ISO 13878). Quant aux teneurs en éléments biodisponibles (P et K), elles ont été obtenues après extraction à l'acétate d'ammonium-EDTA 1M a pH = 4,65 (LAKANEN et ERVIÖ, 1971) et quantifiées par spectrophotométrie d'absorption atomique pour le K et par colorimétrie pour P (UV-1205 Shimadzu, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA USA). Les données issues des différentes analyses ont été utilisées pour évaluer la contribution des fertilisants à la fertilité globale des sols grâce à un système de cotation des facteurs décrit par le BUNASOLS (1990).

**Déterminer de la contribution de la variation des éléments nutritifs à la fertilité :** elle a été établie à partir du calcul de la moyenne pondérée des paramètres chimiques de chaque type de sol en utilisant la formule adaptée par (TRAORE et al., 2019) :

$$M_p = \frac{((D_1 * C_1) + (D_2 * C_2) + \dots + (D_n * C_n))}{(D_1 + D_2 + \dots + D_n)}$$

$M_p$  = Moyenne pondérée du paramètre considéré

$D$  (cm) = profondeur de prélèvement

$C$  = Concentration du paramètre chimique considéré

$D_1 + D_2 + \dots + D_n$  = profondeur totale du sol

Cette moyenne pondérée obtenue par paramètre chimique et par type de sol a été utilisée pour déterminer les classes de fertilité des sols en se basant sur la méthode de gamme minimum décrite par le BUNASOLS, (1990). Cette méthode consiste à attribuer pour chaque valeur moyenne pondérée des paramètres étudiés, une note allant de 1 à 5 selon le niveau de la valeur des attributs du sol (Tableau 2) la somme des cotes obtenus définit une classe de fertilité donnée. Dans la présente étude, la concentration en éléments biodisponibles P et K, l'azote total, le pH-eau, la CEC et la teneur en MO (%) =  $C_{org} * 1,724$  (PANSU et GAUTHEYROU, 2003) ont été considérés. Par la suite, une analyse en composante principale (ACP) a été utilisée pour évaluer la contribution de chaque élément à la fertilité globale par type de sol.

**Paramètres agro-morphologiques:** La hauteur et le diamètre des plants ont été mesurés à 30, 60 et 80 JAS (cotonnier) et à 30, 45 et 60 JAS (maïs) sur vingt (20) plants aléatoirement choisis dans chaque parcelle utile de 25 m<sup>2</sup>. A maturité, la biomasse a été récoltée dans les parcelles utiles de chaque traitement, et séchée jusqu'à obtenir un poids constant (maïs). Le maïs a été égrainé puis pesé pour obtenir le poids grain et extrapolé à l'hectare pour déterminer le rendement.

**Traitement et analyses des données :** Les données collectées ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide du logiciel R version 4.0.3 à un facteur pour déterminer l'effet individuel des traitements sur les paramètres étudiés et deux facteurs pour évaluer l'effet interactif entre le type de sol et la fertilisation. Le test de Tukey (HSD) a été utilisé pour la séparation des moyennes lorsque l'analyse statistique révèle une différence significative. Une analyse en composante principale a été effectuée en utilisant la base produite avec

la somme des cotations (BUNASOLS, 1990) et la cotation individuelle des paramètres considérés (N, P, K, pH, MO) afin d'apprécier la contribution de chaque élément à la fertilité globale.

## II. Résultats

### II.1 Caractéristiques de base des sols expérimentaux et des fertilisants

Les sols expérimentaux sont des sols légers à acidité modérée (pH-eau = 6,3 à 6,7 et pH-KCl = 4,6 à 5,5) à texture sablo-limoneuse sur l'ensemble du profil 0-20 cm du FLIMP et une texture sablo-argileuse pour le FLC (Tableau I). Ils sont faiblement pourvus en nutriments (CEC=3,6 à 6 mEq.100 g<sup>-1</sup>) dont la fraction minéralogique est dominée par le calcium. Ces sols ont une teneur moyenne en matière organique comprise entre 7,9 et 12,8 g.kg<sup>-1</sup>.

**Tableau I :** Granulométrie et composition chimique des sols expérimentaux avant essai

Paramètres	FLIMP	FLC
Argile totale (%)	15,1	26,1
Limon total (%)	26,6	17,9
Sable total (%)	58,3	56
C-organique (g/kg)	5,6	7,44
Azote total (g/kg)	0,04	0,05
P-assimilable (mg/kg)	6,1	6,4
Potassium disponible (mg/kg)	0,32	0,2
Calcium (mg/kg)	53,7	61,2
Magnesium (mg/kg)	9,1	9,6
pH-eau	6,6	6,7
pH-KCl	5,5	5,4
CEC mEq/100 g de sol	4,78	4,79

*CEC=capacité d'échange cationique, C-organique=carbone organique, P-assimilable=phosphore assimilable*

Les analyses des fertilisants utilisés ont montré des teneurs variables en éléments nutritifs en fonction du type de fertilisant (tableau II). Le biochar utilisé pour la production du biochar-SRF était initialement basique (pH=9.8) et constitué à 42% de carbone avec une faible teneur

en azote, phosphore et potassium. Après activation avec le NPK et séchage, le biochar-SRF obtenu présentait une teneur moyenne en carbone (36%), en azote (9%) et en phosphore (4220 mg/100g). L'activation a induit une baisse du pH, du Ca et du Mg. Le pH des fertilisants est classé dans l'ordre suivant biochar pristine >compost> biochar-SRF >NPK (Tableau II). Le compost utilisé était constitué de 1,5% de carbone avec de faibles teneurs en minéraux essentiels (azote < 1%), phosphore (183 mg/100g) et potassium (1065 mg/100g).

**Tableau II** : composition élémentaire en nutriments des fertilisants utilisés

Fertilisants	pH-eau	C-org (%)	N-tot (%)	P-ass	K-dispo (mg/100g)	Ca	Mg
Biochar-pristine	9,8±0,4	42,3±0,8	0,7±0,0	405±8	510±69	1463,2±30	1127,4±316
Biochar-SRF	6,5±0,0	36±1,3	9±3,2	4220±1260	10209±2828	593,2±110	606±73
NPK	6,4±0,7	0,44±0,2	12±0,2	6021±2480	14684±1065	573,3±23	621±15
Compost	7,9±0,0	1,5±0,3	0,67±0,3	183±9	1065±77	602±25	348±11

*Corg=carbone organique, N-tot=azote total, P-ass=phosphore assimilable, K-dispo=potassium disponible, Ca=calcium, Mg=magnesium.*

## II.2 Effets des différents fertilisants sur la croissance des plants

Les traitements appliqués ont eu des effets significatifs sur le diamètre des plants de cotonnier au 60 et 80 JAL pour la l'année 2018 et uniquement à 60 JAL en 2020. En revanche, les réponses sur la hauteur du maïs ont été significatif au 45 et 60 JAS (Tableau III&IV). Globalement, la performance des parcelles sous microdose (T2) était plus élevée au 45 et 60 JAS pour le maïs et au 60 et 80 JAL pour le cotonnier. Le diamètre moyen du cotonnier en 2018 était de 12 cm à 80 JAL pour sous les parcelles amendées par microdose. Pour le maïs, le diamètre moyen a évolué de 17,2 à 19 cm entre le biochar SRF et la microdose. Ces tendances se sont maintenues au niveau de la hauteur des plants en 2018 et 2019. En revanche, en 2020, l'apport du biochar-SRF a engendre une augmentation de la hauteur de 11% par rapport à la pratique vulgarisée de l'épandage de 2,5 t/ha de compost associe au NPK et urée. Par ailleurs, des interactions positives ont été observées entre les traitements et les types de sol sur le diamètre du maïs à 45 et 60 JAS et sur la hauteur du cotonnier de 2020.

**Tableau III : Diamètre moyen (cm) du cotonnier et du maïs en fonction des modes de fertilisation**

Traitements	Coton 2018			Maïs 2019			Coton 2020		
	30JA L	60 JAL	80 JAL	30 JAS	45 JAS	60 JAS	30 JAL	60 JAL	80 JAL
Dose vulgari- sée	5,9±1 ,7 <sup>a</sup>	10,3± 4 <sup>ab</sup>	11,4± 3 <sup>ab</sup>	4,5±3 ,5 <sup>a</sup>	15±3, 1 <sup>ab</sup>	18,4±8 ,7 <sup>ab</sup>	3±0,8 <sub>a</sub>	9±1,7 <sub>a</sub>	11±1 ,7 <sup>a</sup>
Microd- ose	5,7±1 ,8 <sup>a</sup>	11±4 <sup>b</sup>	12,1± 3 <sup>b</sup>	4,4±1 ,5 <sup>a</sup>	16±3, 5 <sup>b</sup>	19±3,5 <sub>b</sub>	3,1±0 ,9 <sup>b</sup>	9,4±2 ,1 <sup>b</sup>	11±5 ,7 <sup>a</sup>
Biochar -SRF	5,7±1 ,7 <sup>a</sup>	10,2± 3 <sup>a</sup>	11,2± 3 <sup>a</sup>	4,3±1 ,5 <sup>a</sup>	13,5± 3,9 <sup>a</sup>	17,2±4 ,3 <sup>a</sup>	3±0,8 <sub>a</sub>	10±2, 1 <sup>b</sup>	11±1 ,8 <sup>a</sup>
<i>Probabilité</i>									
Traitement	ns	*	***	ns	***	***	***	***	ns
Type de sols	ns	***	***	***	***	***	***	***	***
Traitement* Type de sols	ns	ns	ns	ns	***	***	*	**	ns

**Tableau IV : Hauteur moyenne des plants de cotonnier et de maïs en fonction des modes de fertilisation**

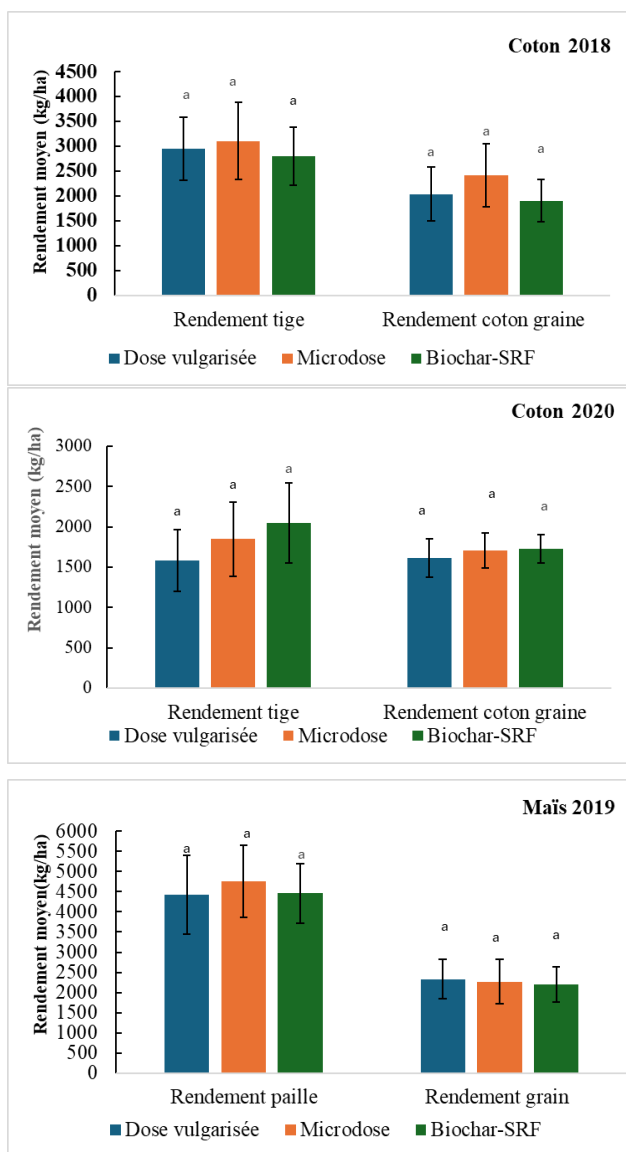
Traitements	Coton 2018			Maïs 2019			Coton 2020		
	30 JAL	60 JAL	80 JAL	30JA S	45JAS	60JAS	30 JAL	60 JAL	80 JAL
Dose vulgari- sée	27±7 <sub>a</sub>	71,2± 20 <sup>ab</sup>	83,3± 24 <sup>ab</sup>	27,3± 2,7 <sup>a</sup>	108±3 1 <sup>a</sup>	140,2 ±25 <sup>b</sup>	17±4 <sub>a</sub>	60±1 0 <sup>a</sup>	83±1 6 <sup>a</sup>
Microd- ose	27,3 ±7 <sup>a</sup>	75,4± 22 <sup>b</sup>	88,3± 25 <sup>b</sup>	27,3± 2,9 <sup>a</sup>	110,5 ±33 <sup>a</sup>	142±2 6 <sup>b</sup>	17±5 <sub>a</sub>	61,3± 13 <sup>a</sup>	83,5± 18 <sup>a</sup>
Biochar -SRF	26±6 <sub>a</sub>	70±19 <sub>a</sub>	82±22 <sub>a</sub>	25,4± 10 <sup>a</sup>	103,2 ±33 <sup>a</sup>	132,1 ±28 <sup>a</sup>	16,4 ±5 <sup>a</sup>	65,1± 12 <sup>b</sup>	88±1 5 <sup>b</sup>
<i>Probabilité</i>									
Traitement	ns	*	*	ns	ns	*	ns	***	***
Type de sols	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Traitement* Type de sols	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	***	***

### **II.3 Variation des rendements dans la rotation en fonction des pratiques de fertilisation**

Au cours des trois campagnes d'expérimentation, les rendements moyens du coton ont été de 1902 kg/ha. Malgré l'absence de différence significative, les parcelles amendées par microdose ont produit des rendements plus élevés en 2018 soit 2419kg/ha (Figure 2). De même en 2020, le traitement biochar-SRF malgré sa faible valeur fertilisante par rapport aux traitements T1 et T2 a été plus performant que la microdose et la pratique vulgarisée avec 1729, 1711 et 1616 kg/ha respectivement. Le rendement moyen obtenu avec l'apport de 125 kg/ha de biochar-SRF au cours des deux années était de 1904 et 1729 kg/ha respectivement en 2018 et 2020. En comparant ces résultats à la pratique vulgarisée (T1), l'apport du biochar-SRF (T3) a induit des augmentations de 7% et 29% du rendement en coton graine et paille en 2020.

Considérant le nombre de capsules moyen par l'hectare, les résultats de l'ANOVA ( $p=0,0457$ ) ont montré que l'apport du biochar-SRF a été plus bénéfique à la production de capsules au cours de la campagne 2020 (Tableau V). Durant la même campagne une interaction positive a été observée entre les pratiques de fertilisation et le type de sol ( $p=0.00043$ ). Ainsi l'application du biochar-SRF a eu des performances plus élevées sur le FLC comparativement à l'effet du même traitement sur le FLIMP. La production moyenne en capsules était de 533639 capsules/ha sur le FLC contre 341402 /ha pour le FLIMP soit un surplus de 192237 capsules/ha (Tableau V).

Concernant l'effet des traitements sur le maïs, les pratiques de fertilisation combinées au type de sols ont enregistré des réponses variables sans toutefois être significative. La tendance observée sur le coton s'est maintenue sur le maïs avec un rendement grain moyen de 2195 kg/ha sous les parcelles amendées avec le biochar-SRF.



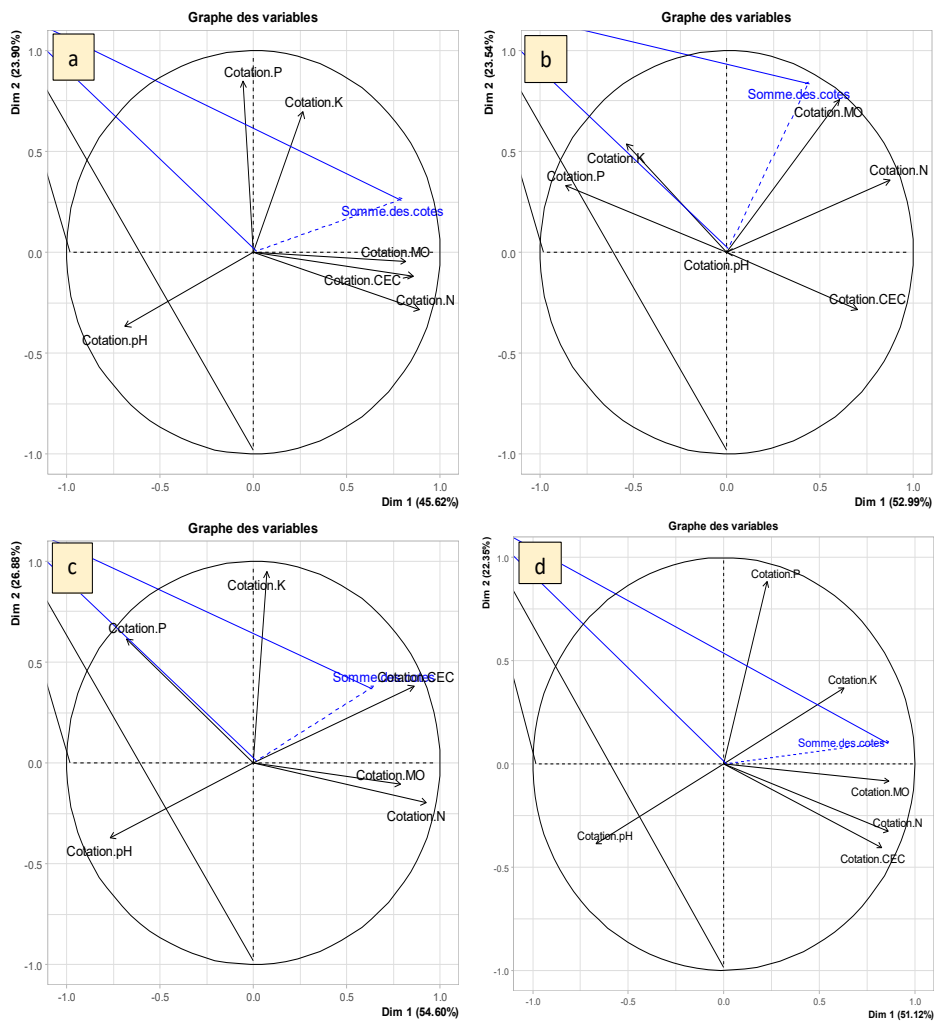
**Figure 2 :** Evolution des rendements moyens du coton et du maïs en fonction de la fertilisation

**Tableau V :** Nombre moyen de capsules de coton/ha en fonction du type de sols et de la fertilisation

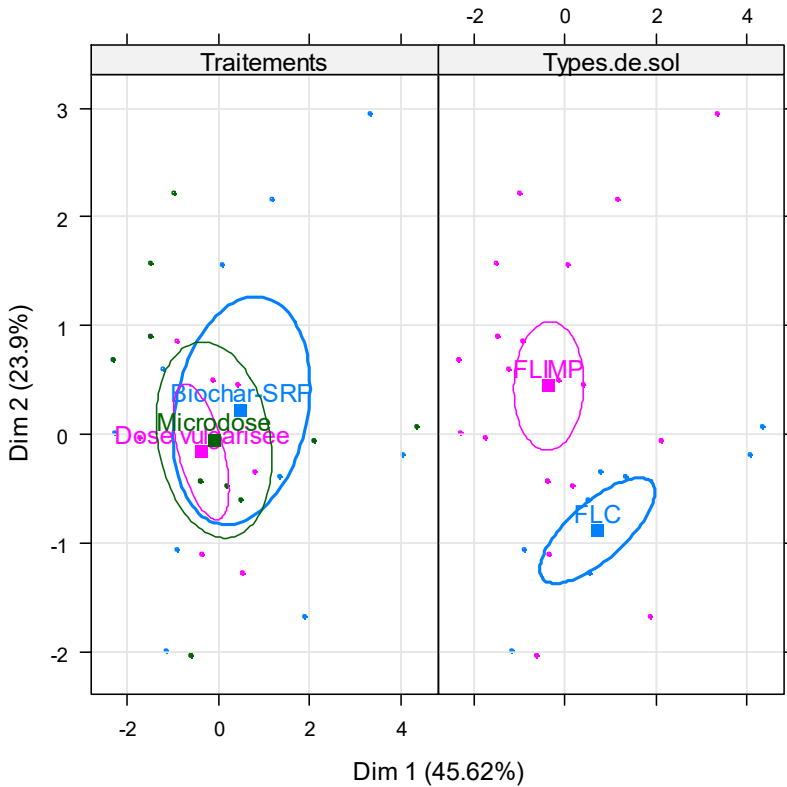
Modalités	Nombre de capsules	
	2018	2020
Dose vulgarisée*FLC	313865 <sup>a</sup> ±36320	317611 <sup>b</sup> ±33168
Microdose*FLC	250000 <sup>a</sup> ±10250	313993 <sup>a</sup> ±37774
Biochar-SRF*FLC	359497 <sup>a</sup> ±28784	533639 <sup>c</sup> ±89603
Dose vulgarisée*FLIMP	348539 <sup>a</sup> ±20822	348539 <sup>b</sup> ±20116
Microdose*FLIMP	299615 <sup>a</sup> ±35908	312115 <sup>a</sup> ±8065
Biochar-SRF*FLIMP	331402 <sup>a</sup> ±18905	341402 <sup>ab</sup> ±30975
Traitements	0.07063	0.0054781
Type de sols	0.44439	0.0031893
Traitements*Type de sols	0.39099	0.0004324

## II.4 Evolution de la fertilité globale des sols amendes au biochar

Les résultats de l'ACP (Figure 3) montrent que la fertilité globale des sols expérimentaux s'est maintenue au cours de la période expérimentale en dépit des exportations d'éléments par les cultures. L'analyse de la figure montre que la classe de fertilité a été améliorée par les modes de gestion de la fertilité ; leur contribution est expliquée par l'ensemble des deux axes à 69,4% de variation avec des niveaux de variabilité de 45,6 et 23,9% respectivement pour l'axe F1 et l'axe F2. Les effets observés montrent que la contribution des différents traitements ne sont pas significatifs même si l'apport du biochar-SRF semble être plus bénéfique à l'amélioration de la qualité du sol (Figure 4). Pour l'ensemble du dispositif, la fertilité globale est beaucoup plus corrélée à la teneur en phosphore, potassium, la CEC et la matière organique. En ce qui concerne l'effet des traitements individuels, l'ensemble des paramètres ont positivement contribué à l'amélioration de la fertilité globale du sol dans le traitement à base de biochar (Figure 3-b). En revanche, au niveau des parcelles ayant reçu les traitements microdose et dose vulgarisée, le pH a négativement affecté l'évolution de la fertilité. Les effets individuels des traitements sont classés dans l'ordre biochar-SRF > microdose > dose vulgarisée et leurs effets sont légèrement prononcés sur le FLIMP que sur le FLC (Figure 4).



**Figure 3 :** Contribution des différents éléments à la fertilité du sol a) *du dispositif*, b) *biochar-SRF*, c) *microdose*, d) *dose vulgarisée*



**Figure 4 :** Réponses des types de sol aux fertilisants appliqués

### III. Discussion

#### III.1 Potentiel d'amélioration de la croissance et des rendements des types de fertilisation

Les résultats des recherches menées sur trois campagnes agricoles à Koumbia ont montré que la pratique de la fertilisation organo-minérale présente un intérêt capital pour l'amélioration de la productivité des sols dégradés. En effet, les fertilisants apportés ont significativement augmenté la croissance des plants et le rendement du maïs (tableau 4 et figure 2). De nombreux auteurs (BONZI et al., 2008; KOULIBALY et al., 2015) ont mis en évidence les effets bénéfiques de l'apport combiné des engrais minéraux et organiques sur le coton et le maïs dont les réponses positives ont été attribuées aux effets synergiques dans la

fourniture des nutriments et l'amélioration des paramètres physiques du sol. A l'échelle individuelle, le compost/fumier a un impact positif sur les rendements agricoles et sur la restauration de la fertilité des sols en culture continue (OUANDAOGO et al., 2016). Ces résultats obtenus sous des régimes de précipitations marquées par de nombreuses poches de sécheresse laissent entrevoir des perspectives d'une amélioration plus importante des rendements en condition normale. Cependant, la croissance des plants a été plus élevée avec les engrais solubles en particulier la dose vulgarisée associée au compost (témoin) et la microdose (Tableau II). Cela pourrait s'expliquer par une disponibilité rapide des nutriments sous ces traitements comparativement au biochar-SRF dont le mécanisme de libération lente des nutriments limite le relargage d'une grande quantité de nutriments dans la solution du sol (SABA, 2023). En effet, la vitesse de dissolution des engrais solubles NPK et l'urée étant supérieure à celle des engrais-SRF et ceci permet de garantir les nutriments durant les stades de grand besoin comme les phases de croissance contrairement aux engrais-SRF (TRENKEL, 2010; ALSHAMAILEH et al., 2018). Par conséquent, l'apport des engrais solubles favorise une nutrition convenable des plants contrairement aux engrais SRF dont le mécanisme de libération lente permet de contrôler le taux de dissolution. Ces résultats pourraient aussi être expliqués par un apport total en nutriments plus élevé. En effet, le traitement (T1) dose vulgarisée a reçu en plus d'une dose élevée de NPK et d'urée ; 2,5 t/ha du compost dont la minéralisation permet de renforcer la réserve nutritive du sol (ROOSE, 2018) ce qui se traduit par une meilleure croissance des plants. De même, la performance de la microdose pourrait s'expliquer par le fait que la localisation des engrais à proximité du système racinaire permet aux cultures d'utiliser efficacement les éléments nutritifs avec une faible énergie de succion (IBRAHIM et al., (2015 ; TABO et al., 2007).

Les plants de cotonnier et de maïs ont enregistré une faible croissance avec le biochar-SRF a comparativement à la dose vulgarisée et la microdose. Ce résultat serait probablement lié au bon fonctionnement de la libération lente des nutriments qui permet de limiter la disponibilité immédiate des nutriments durant certaines phases de besoins accrus en nutriments (LIU et al.,2014) et expliquerait en partie la faible performance observée avec les engrais SRF par rapport aux engrais solubles. Notons également que la faible performance du traitement à base de biochar SRF pourrait aussi être liée aux effets

néfastes des épisodes sèches enregistrées durant les stades de pleine croissance des plants. En effet, durant les trois campagnes d'expérimentation plusieurs poches de sécheresse de durée variant de 6 à 21 jours ont été enregistrées. Pourtant, il est connu des travaux de LIU et al., (2014) que l'humidité et la température du sol sont des facteurs affectant la biodisponibilité des nutriments des engrais-SRF. Selon BOGUTA et al., (2019), les engrais à libération lente ont besoin d'une humidité suffisante pour briser les matrices de rétention afin de libérer les nutriments adsorbés. En plus, il est important de rappeler qu'en terme d'apport nutritifs, ce traitement avait un stock initial inférieur aux deux autres (Tableau II), ceci combiné au comportement de libération lente pourrait être l'un des facteurs explicatifs de la faible croissance des plants observée.

Considérant les paramètres de rendement, seul le nombre moyen de capsules du cotonnier a été significativement affecté par l'interaction type de sol et pratique de fertilisation en 2020. De même, l'émission des capsules était plus importante sous les parcelles amendées au biochar-SRF malgré le fait que sa teneur initiale en éléments nutritifs était inférieure aux traitements à base d'engrais minéraux strict ou associés au compost. Cette bonne performance du biochar-SRF serait liée à l'effet chaulant du biochar (GWENZI et al., 2018) combiné à une bonne nutrition hydrique dans le FLC induit par sa fraction argileuse relativement plus élevée par rapport au FLIMP (Tableau I). Selon SIGUA et al. (2016), l'amélioration de la rétention en eau et l'effet chaulant du biochar lié à la présence de cendres dissoutes constituent des facteurs expliquant la bonne réponse du biochar dans les sols tropicaux surtout durant les épisodes sèches.

Il faut noter que malgré l'absence de différence significative, les résultats obtenus ont été relativement bon par rapport à la moyenne de la zone pour la période de 2008 à 2017 qui était de 1104 kg/ha (MAAH, 2020) sous pratique recommandée. Un gain supplémentaire de 800 kg de coton graine a été observé avec l'apport du biochar-SRF. Concernant le rendement obtenu, les traitements appliqués ont eu des effets similaires sur le rendement tige et grain de cotonnier et de maïs au cours des trois campagnes d'expérimentation indépendamment du type de sol. Néanmoins, il convient de rappeler que le biochar-SRF apporte moins d'éléments fertilisants ; corroborant de ce fait les travaux de (SCHMIDT et al., 2017) qui démontrent que l'activation du biochar augmente son efficacité même à faible dose. De ce fait, la performante

observée avec le biochar-SRF peut être en partie expliquée par une optimisation des nutriments causée par la libération lente qui permet la synchronisation de l'apport de fertilisants avec la demande des cultures ; phénomène essentiel pour assurer une adéquation entre les quantités de nutriments absorbée, celles réellement utilisées et le rendement final (ALSHAMAILEH et al., 2018). En effet, il a été démontré que le biochar-SRF est susceptible de limiter les pertes de nutriments notamment les formes azotées et d'améliorer l'efficacité d'absorption (SABA et al., 2022a; LIU et al., 2019; JEFFERY et al., 2011) et la disponibilité des nutriments fortement retenu par le sol grâce à un effet chaulant bénéfique aux sols tropicaux dégradés (GWENZI et al., 2018). Cependant, des cas d'augmentation de rendements du maïs à court terme ont été le plus souvent associés aux apports de grandes doses de biochar pristine combiné au NPK (LELE et al., 2016; BURGEON, 2017). Ainsi, certains auteurs ont enregistré en Chine des augmentations de 15,1 à 18,4% du rendement de maïs sous apport de dose vulgarisée comparativement aux engrais-SRF (GUAN et al., 2014). Cette performance a été attribuée au renforcement du comportement de libération lente provoquée par l'enrobage du biochar-SRF par l'attapulgite ayant conduit à une baisse de la disponibilité des nutriments durant les stades de besoin accru.

### **III.2 Rôle du biochar-SRF dans l'amélioration de la fertilité des sols**

L'association des engrais organiques et de la fertilisation minérale est une pratique courante dans les zones cotonnières de l'ouest et du Burkina Faso (POUYA et al., 2013; BLANCHARD et al., 2017). Au cours de cette étude, les caractéristiques chimiques du sol ont connu une évolution positive par rapport à la situation de référence. Ce constat confirme l'importance de la pratique de la fumure organo-minérale dans la gestion de la fertilité des sols agricoles (BONZI et al., 2008 ; BACYE et al., 2020). Ces effets bénéfiques sont attribuables au rôle clé de la matière organique dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques du sol qui ont été largement démontré sur des essais longue durée recevant de fortes doses (>10 t/ha) d'engrais organiques (OUANDAOGO et al., 2016).

Malgré l'absence de différence statistique, les paramètres du sol étaient légèrement plus élevés avec l'application du biochar-SRF comparativement au témoin. Par exemple, la teneur en C-org est passée

de 8,6 g/kg pour le témoin ayant reçu 150 kg de NPK et 2,5 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> de compost à 10,5 g/kg pour le traitement biochar-SRF soit une augmentation de 1,9 unités. Cette tendance s'est traduite selon les résultats de l'ACP par une contribution neutre (pH) à positive de l'ensemble des paramètres étudiées à la fertilité globale du sol sous ce traitement contrairement aux traitements à base d'engrais minéraux (T1 et T2) où le pH a eu un effet négatif sur l'évolution de la fertilité des sols expérimentaux (Figure 4-a). La contribution majeure de la matière organique sous ce traitement pourrait s'expliquer par son apport élevé en carbone (STAVI & LAL, 2013; ZHANG et al., 2016). Selon ces mêmes résultats, le biochar-SRF a eu un effet mineur sur le pH du sol d'où une contribution neutre à la fertilité globale du sol. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les quantités appliquées (125 kg/ha) étaient insuffisantes pour induire des améliorations significatives du pH à court terme sur des sols initialement acides. Pour certains auteurs comme BOGUTA et al. (2019) et SUTHAR et al. (2018), l'apport du biochar peut accentuer l'acidité du sol lorsque celui-ci est issu de la pyrolyse à basse température ou activé avec une source acidifiante comme l'acide sulfurique ou l'engrais ammoniacal. Par ailleurs, le faible effet du biochar sur le pH pourrait aussi être lié aux pertes des cendres solubles dont dépend l'effet chaulant du biochar. En effet, une bonne proportion de ces cendres serait lessivée par l'eau utilisée pour l'arrêt de la pyrolyse. Pourtant, la correction du pH du sol conditionne la biodisponibilité de certains des éléments nutritifs comme le phosphore et leur absorption par les plantes, qui à leur tour déterminent l'amélioration de la fertilité du sol et des rendements agricoles. La contribution négative du pH à la fertilité du sol sous les traitements microdose et dose vulgarisée s'expliquerait par le fait que les engrais minéraux ont un effet acidifiant sur le sol.

## Conclusion

L'épuisement de la fertilité des sols agricoles est un sujet préoccupant affectant globalement la performance des agrosystèmes. Différentes stratégies comme l'usage du biochar et des engrais à libération lente d'une manière générale sont souvent utilisées pour améliorer la disponibilité des nutriments dans les régions arides. La présente étude conduite à Koumbia durant trois campagnes agricoles a permis de d'évaluer la performance du biochar-SRF sur deux types de sol lessivés. Celle-ci a montré des effets positifs du biochar-SRF sur la croissance des plantes, le nombre de capsules et quelques paramètres du sol

comme le carbone, l'azote et la CEC. La teneur initiale en azote a augmenté de 62% avec l'incorporation du biochar-SRF. Le stock de carbone organique est passé de 7,4 g.kg<sup>-1</sup>, situation de référence à 8,6 g.kg<sup>-1</sup> pour la dose vulgarisée et 10,5 g.kg<sup>-1</sup> respectivement pour le témoin et le biochar-SRF. Les rendements moyens en coton graine avec le biochar-SRF était plus élevé que la moyenne obtenue dans la zone soit un accroissement de rendement 800 kg/ha. En dépit de sa faible teneur initiale en éléments minéraux, le biochar-SRF a eu une réponse similaire à la dose vulgarisée et la microdose. Grâce à l'amélioration des paramètres du sol, le biochar-SRF a positivement contribué à l'augmentation de la fertilité des sols avec un effet légèrement prononcé sur le FLIMP. Nous pensons qu'il est possible d'utiliser le biochar-SRF comme une approche alternative pour améliorer la performance des engrais minéraux grâce à la synchronisation de l'apport avec la demande des cultures. Par conséquent ces résultats confirment que l'incorporation du biochar riche en carbone constitue un moyen de lutte efficace contre la dégradation des sols tropicaux. Il serait intéressant de poursuivre l'étude en incluant des recherches sur la vie microbienne des sols amendés au biochar-SRF et une analyse technico-économique pour son adoption par un grand nombre de producteurs.

## **Remerciements**

Les auteurs remercient l'Académie de Recherche pour l'Enseignement Supérieur (ARES), pour le financement de cette recherche à travers le projet BIOPROTECHSOL, les producteurs de Koumbia et les stagiaires et techniciens ; Emilie Marit, Moussa Gnissien, Inéissa R. Bacia pour leur précieuse aide sur le terrain et au laboratoire

## **Conflit d'intérêt**

Tous les auteurs déclarent aucun conflit d'intérêt

## **Contribution des auteurs**

FS a élaboré la méthodologie et a assuré la conduite et le suivi de l'essai, la collecte et analyse des données, la rédaction de la version originale de l'article.

HS et KC : Elaboration de la méthodologie, traitement des données et révision de l'article.

DC : nettoyage de la base de données, analyse, relecture de l'article.

HBN et JTC ont contribué à la validation de la méthodologie, l'acquisition de fonds, la coordination du projet, la supervision de la recherche et la validation des résultats.

## Références bibliographiques

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>

ANDRÉN, O., KIHARA, J., BATIONO, A., VANLAUWE, B., & KÄTTERER, T. (2007). Soil climate and decomposer activity in Sub-Saharan Africa estimated from standard weather station data: A simple climate index for soil carbon balance calculations. *Ambio*, 36(5), 379–386. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[379:SCADAI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[379:SCADAI]2.0.CO;2)

BACYE, B., KAMBIRE, H. S., & SOME, A. S. (2020). Effets des pratiques paysannes de fertilisation sur les caractéristiques chimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé en zone cotonnière à l'Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(6), 2930. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.39>

BLANCHARD, M., VALL, É., TINGUERI, L. B., & MEYNARD, J.-M. (2017). Identification, caractérisation et évaluation des pratiques atypiques de gestion des fumures organiques au Burkina Faso : sources d'innovation ? *Autrepart*, 81(1), 115–134. <https://doi.org/10.3917/autr.081.0115>

BOGUTA, P., SOKOŁOWSKA, Z., SKIC, K., & TOMCZYK, A. (2019). Chemically engineered biochar – Effect of concentration and type of modifier on sorption and structural properties of biochar from wood waste. *Fuel*, 256(March), 115893. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115893>

LELE, B., JO, L., & CEDRIC, K. (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.

BONZI, M., LOMPO, F., KIBA, D. I., & SÉDOGO, M. P., (2008).

Influence du mode de gestion de la fertilité des sols sur l'évolution de la matière organique et de l'azote dans les zones agro écologiques du Burkina Faso (Issue July 2017).

BUNASOLS. (1990). Manuel pour l'évaluation des terres. Documentations techniques n°6, Ouagadougou.

BURGEON, V. (2017). Biochar effects on soil physicochemical properties and on maize yields (*Zea mays* L.) in tropical soils of Burkina Faso. 68.

[https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2970/4/VictorBurgeon\\_TFE\\_Biochar.pdf](https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2970/4/VictorBurgeon_TFE_Biochar.pdf)

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>

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>

GUAN, Y., SONG, C., GAN, Y., & LI, F. M. (2014). Increased maize yield using slow-release attapulgitite-coated fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(3), 657–665. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0193-2>

GUENOT, A., & HUCHET-BOURDON, M. (2014). Rôle du coton sur la filière maïs au Burkina Faso. *Économie Rurale*, 341, 107–119. <https://doi.org/10.4000/economierurale.4353>

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., KAMMANN, C. I., SCHMIDT, H. P., KAPPLER, A., & BEHRENS, S. (2017). Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171214>

IBRAHIM, A., ABAIDOO, R. C., FATONDJI, D., & OPOKU, A.

(2015). Hill placement of manure and fertilizer micro-dosing improves yield and water use efficiency in the Sahelian low input millet-based cropping system. *Field Crops Research*, 180, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.022>

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>

JEFFERY, S., VERHEIJEN, F. G. A., VELDE, M. VAN DER, & BASTOS, A. C. (2011). Agriculture , Ecosystems and Environment A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. “Agriculture, Ecosystems and Environment,” <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>

KAMBOU KKA, HEMA SA, TRAORE M, KOULIBALY B, A WETZER, AA SANON, 2024. Typologies et aptitudes agronomiques des sols des micro-bassins versants des communes de Koumbia et de Satiri, dans la zone soudanienne du Burkina Faso. Vol. 26 No. 2 (2024): Sciences Technologiques et Agronomiques, DOI: 10.4314/jrsul.v26i2.30

KARAMBIRI, S. M. (2018). La gouvernance territoriale par les chartes foncières locales dans la région des Hauts Bassins / Burkina Faso. *Thèse de d*, 285. <http://agritrop.cirad.fr/595579/1/ID595579.pdf> LB - E11

KOULIBALY, B., DAKUO, D., OUATTARA, A., TRAORE, O., LOMPO, F., N. ZOMBRE, P., & YAO-KOUAME, A. (2015). Effets de l’association du compost et de la fumure minérale sur la productivité d’un système de culture à base de cotonnier et de maïs au Burkina Faso. *Tropicultura*, 33(2), 125–134.

LAKANEN E. & ERVIO R., (1971). A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soil. *Acta Agr. Fennica* 123 223-232

LIU, G., ZOTARELLI, L., Li, Y., DINKINS, D., WANG, Q., & OZORES-HAMPTON, M. (2014). Controlled-Release and Slow-Release Fertilizers as Nutrient Management Tools 1. *Tampabay. Wateratlas.Usf.Edu*, 1–7. <http://edis.ifas.ufl.edu>.

LIU, X., LIAO, J., SONG, H., YANG, Y., GUAN, C., & ZHANG, Z. (2019). A Biochar-Based Route for Environmentally Friendly

Controlled Release of Nitrogen: Urea-Loaded Biochar and Bentonite Composite. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46065-3>

MAAH, (2020). Tableau de bord statistique de l'agriculture 2018, 56 p

OUANDAOGO N., OUATTARA B., POUYA M-B., GNANKAMBARY Z., NACRO H-B., SEDOGO M-P., (2016). Effets des fumures organo-minérales et des rotations culturales sur la qualité des sols. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 10(2): 904-918, 2016. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i2.37>

OUEDRAOGO W., OUEDRAOGO L., KONKOBO-KABORE M., DA DEC., (2021). Spatio-temporal dynamic of land use/occupation in the communes of Koumbia and Dedougou (Burkina Faso). *International Journal of Science Academic Research* Vol. 02, Issue 01, pp.759-769, January, 2021

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>

PALLO F. J. et THIOMBIANO L., (1989). Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions du Burkina Faso : caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole. *SOLTOP 89* : 307-327

PANSU, M., & GAUTHEYROU, J. (2003). L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. IRD Éditio.

POUYA, B. M., SAVADOGO, O. M., OUEDRAOGO, J., VOGNAN, G., DAKUO, D., SEDOGO, P. M., & LOMPO, F. (2020). De l'adoption des technologies de gestion de la fertilité des sols *Research Article*. 10(June), 1–2.

POUYA, M. B., BONZI, M., GNANKAMBARY, Z., TRAORE, K., OUEDRAOGO, J. S., SOME, A. N., & SEDOGO, M. P. (2013). Pratiques actuelles de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la production du cotonnier et sur le sol dans les exploitations cotonnières du centre et de l'ouest du burkina faso. *Cahiers Agricultures*, 22(4), 282–292. <https://doi.org/10.1684/agr.2013.0643>

ROOSE, É. (2018). Restauration de la productivité des sols tropicaux. In *Lutte antiérosive*. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.12455>

SABA F., 2023. Etude des effets de l'utilisation combinée du biochar et de la fertilisation microdose sur les propriétés agro-pédologiques des zones ouest et centre-nord du Burkina Faso". Thèse Agro-Bio Tech, Université de Liège, Belgique, 183 pages

SABA F., CORNELIS J-T., SAWADOGO H., LEFEBVRE D., BACIA R-K-I., CISSE D., BANDAOGO A-A., TRAORE M., NACRO H-B., 2022. nutrient-charged biochars increased nutrient-use efficiency in a cotton–maize rotation in Burkina Faso, *Agronomy journal*, <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/agj2.21283>

SABA F., SAWADOGO H., CORNELIS J-T., OUEDRAOGO A-K., CISSE D., COULIBALY K., NACRO H-B., 2022. Gestion efficiente des nutriments par l'utilisation de biochar et compost dans un système zaï au Centre-nord du Burkina Faso, *Agronomie Africaine*, <https://www.ajol.info/index.php>

SAWADOGO, H. (2011). Using soil and water conservation techniques to rehabilitate degraded lands in Northwestern Burkina Faso. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9(1), 120–128. <https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0552>

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>

SIGUA, G. C., NOVAK, J. M., & WATTS, D. W. (2016). Ameliorating soil chemical properties of a hard setting subsoil layer in Coastal Plain USA with different designer biochars. *Chemosphere*, 142, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.016>

STAVI, I., & LAL, R. (2013). *Agroforestry and biochar to offset climate change : a review*. 81–96. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0081-1>

SUTHAR, R. G., WANG, C., NUNES, M. C. N., CHEN, J., SARGENT, S. A., BUCKLIN, R. A., & GAO, B. (2018). Bamboo biochar pyrolyzed at low temperature improves tomato plant growth and fruit quality. *Agriculture (Switzerland)*, 8(10), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agriculture8100153>

TABO, R., BATIONO, A., GERARD, B., NDJEUNGA, J.,

MARCHAL, D., AMADOU, B., ANNOU, G., SOGODOGO, D., TAONDA, J. B. S., HASSANE, O., MAIMOUNA, K., & KOALA, S. (2007). Improving cereal productivity and farmers' income using a strategic application of fertilizers in West Africa. In A. Bationo, B. Waswa, J. Kihara, & J. Kimetu (Eds.), *Advances in integrated soil fertility management in Sub-Saharan Africa: Challenges and opportunities* (pp. 201–208)

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>

VALL, E., BLANCHARD, M., DIALLO, M., CESAR, J., & POCHARD CHAPUIS, R. (2006). *Situation agropastorale des villages de Koumbia et Waly (Burkina Faso) : diversité et pratiques - CIRDES*. 46.

ZHANG, D., PAN, G., WU, G., KIBUE, G. W., LI, L., ZHANG, X., ZHENG, J., ZHENG, J., CHENG, K., JOSEPH, S., & LIU, X. (2016). Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere*, 142, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.088>

