

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



Fatimata SABA

Membres du jury :

Président : Prof. Philippe LEJEUNE (ULiège, Belgique)

Promoteurs : Prof. Jean-Thomas CORNELIS (ULiège, Belgique)

Prof. Hassan Bismarck NACRO (UNB, Burkina Faso)

Lecteurs : Prof. Charles BIELDERS (UCLouvain, Belgique)

Prof. Gilles COLINET (ULiège, Belgique)

Prof. Jérôme YAMEOGO (UNB, Burkina Faso)

Dr. Bazoumana KOULIBALY (INERA, Burkina Faso)

Dr. Marie DINCHER (ULiège, Belgique)

COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE BELGIQUE
UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBLoux AGRO-BIO TECH
UNIVERSITÉ NAZI BONI

**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.**

Fatimata SABA

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en
sciences agronomiques et ingénierie biologique et en Système de production
végétale, spécialité Science du sol

Promoteurs :

Prof. Jean-Thomas CORNELIS (ULiège, Belgique)

Prof. Hassan Bismarck NACRO (UNB, Burkina Faso)

Année civile : 2023

Avec le soutien financier de l'Académie de Recherche et d'Enseignement
Supérieur (ARES).



©Fatimata SABA juin 2023

Résumé

Fatimata SABA. (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 rédigée en français). Gembloux, Belgique, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, 183 pages, 21 tableaux, 33 figures.

Résumé

L'augmentation de la demande alimentaire exige de tester des solutions innovantes, efficaces et moins contraignantes, à mettre en œuvre pour améliorer durablement la fertilité des sols et les rendements agricoles sur les sols tropicaux pauvres en nutriments. L'adoption des formulations à libération lente produites localement à base de résidus agricoles peu valorisés, semble être l'une des voies prometteuses pour la fertilisation de ces sols. Compte tenu de ses propriétés adsorbantes, le biochar, sous-produit de résidus agricoles pyrolysés, semble être un matériau idéal pour la production de fertilisants à libération lente (SRF) pour amender les sols pauvres en nutriments et à fort potentiel de pertes de nutriments. La présente thèse vise à élaborer une technique de gestion durable des sols par l'utilisation combinée des fertilisants à base de biochar et microdose (biochar-SRF) et à évaluer la réponse des sols et principales cultures (coton, maïs et sorgho) à l'application du biochar-SRF. Deux approches ont donc été adoptées : une première approche laboratoire qui a permis d'évaluer les propriétés physico-chimiques et la libération des nutriments à partir du biochar-SRF produit par mélange du biochar avec l'engrais NPK dissout. Par la suite, l'efficacité du biochar-SRF a été évaluée par des tests d'application au champ en station de recherche et en milieu paysan. En station de recherche, le biochar-SRF (40N-3,4P-18,6K) a été appliqué par microdose à la dose de 4 g par poquet soit 125 kg.ha⁻¹) en comparaison à l'application de 4 g NPK (46N-13,3P-19,5K) par poquet (125 kg.ha⁻¹), de 4 g/poquet de biochar enrobe (37,3N+3,5P+16,5K) soit 125 kg/ha) et à l'épandage de 2,5 t de compost ha⁻¹ associé à 150 kg de NPK.ha⁻¹ (92,1N-22,4P-58,4K) en production de maïs et de coton. En milieu paysan, le biochar-SRF (41,67 kg.ha⁻¹ soit 2 g/poquet) a été comparé à l'application selon les pratiques traditionnelles, de 2,1 t.ha⁻¹.an⁻¹ de biochar pristine (non traité) en association avec le NPK (41,67 kg.ha⁻¹) et à l'épandage de 2,1 t. ha⁻¹ de compost et 100 kg de NPK kg.ha⁻¹ en culture de sorgho sous système *zai*. Les résultats obtenus ont montré que la concentration de la solution nutritive agit positivement sur le degré d'adsorption des nutriments par le biochar. Comparé au NPK, le relargage des nutriments par le biochar-SRF est plus faible, étant donné la rétention des nutriments par le biochar. Les résultats des tests agronomiques en station ont montré qu'en dépit des plus faibles valeurs nutritives du biochar-SRF produit, son application a permis d'obtenir des rendements similaires à ceux de la microdose de NPK et a permis d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote. Les résultats sont d'autant plus prometteurs lorsque le biochar-SRF est enrobé de gomme arabique. Les travaux conduits dans la région du Centre-nord, ont montré que les apports de grandes doses de biochar pristine (biochar non traité) associées au NPK en microdose et le biochar-SRF, permettent

d'obtenir des rendements du sorgho plus élevés que la dose vulgarisée (épandage de 2,1 t de compost/ha.an et de 100 kg de NPK.ha⁻¹), avec des surplus de rendement en grain allant de 152 à 420 kg.ha⁻¹.

L'apport du biochar-SRF est donc un moyen simple et efficace qui tend à optimiser l'utilisation des nutriments par les cultures, et à améliorer les rendements. Les réponses obtenues avec les différentes cultures testées, devraient servir de base pour la formulation de doses de biochars-SRF adaptées à chaque type de sol, de culture et du climat, en mobilisant la biomasse disponible dans chaque zone pour la production du biochar, afin de rendre la technologie accessible aux petits exploitants.

Mots clés : fertilité des sols, efficacité d'utilisation des nutriments, microdose, biochar-SRF, Burkina Faso.

Abstract

Fatimata SABA. (2023). "Combining effects of biochar and microdose fertilization on the agro-pedological properties of the western and central-northern zones of Burkina Faso" (PhD Dissertation in French). Gembloux, Belgium, Gembloux Agro-Bio Tech, Liege University, 183 pages, 21 tables, 33 figures.

Abstract

The increasing of world food demand requires testing innovative and cost-effective solutions to sustainably improve agricultural soil fertility and crops yields. Slow-release based on biochar locally produced with agricultural residue could slow down nutrient release, which can enhance fertilizer-use efficiency is seemed to be a promising approach in farming systems dominated by poor and leached soils. Due to their adsorbant properties, biochar could to be an ideal carrier to produce a slow-release fertilizers which could plays crucial role in improving soils fertility. This study aimed to investigate sustainable soil management techniques through the combined use of biochar-based fertilizers and microdosing and to evaluate the response of major crops (cotton, maize and sorghum) to the application of biochar-SRF. Experiment was carried out in the laboratory to characterize biochar- obtained with increasing concentration of NPK' solution and its nutrient release profile. After that research station and on-farmers to compare the effect of biochar applied on soils parameters and crops yields. The results obtained showed that increasing the concentration of the NPK solution used for impregnation has significantly affected the final nutrient content of the biochar-SRF produced. Nutrient-charged biochar slow down nutrient release than pur NPK. Biochar-based fertilizers significantly increased soil organic C content, as well as extractable P and Ca, without improving cotton yields, compared to conventional practice and microdose of NPK. However, when nutrient-charged biochar was coated with Acacia gum, N-use efficiency was improved compared to uncoated nutrient-charged biochar. The results of on-farm studies carried out in the north-central region showed that applied high amount of pristine biochar combined with microdosing of NPK and biochar-SRF seem to be more efficiency for the arid conditions than conventionnel practice and control. It should however be noted, that the performance of the plots treated with biochar-SRF (41,67 kg/ha) exceeded that of the broadcasting 2,1 t of compost/ha and broadcasting of 100 kg NPK. The surplus of yield obtained is about 10 to 27%. In addition, the carbon content changed positively with the application of biochar

We conclude that biochar-based fertilizers could be a simple and effective way to optimize nutrient use by crops and improve yields. This study should serve as a basis for formulating biochar-SRF adapted to each type of soil, crop and climate conditions, mobilizing the biomass available in each area for biochar production in order to make this technology accessible to small-scale farmers.

Keywords: soil fertility, nutrient efficiency, crop yields, biochar-SRF, Burkina Faso

Remerciements

Ce travail de longue haleine, a nécessité l'aide et la collaboration de plusieurs personnes. Il est donc normal d'exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes morales et physiques qui ont collaboré aux travaux de recherche et à la rédaction de ce mémoire. Nos remerciements s'adressent particulièrement à :

- mes promoteurs de thèse, Pr Jean-Thomas Cornelis et Pr Hassan Bismarck Nacro, qui m'ont guidée par leurs précieux conseils et m'ont encouragée tout au long des travaux de terrain et de rédaction de la présente thèse. Ces années passées à vos côtés ont été très enrichissantes du point de vue humain et professionnel ;
- aux membres de mon comité de thèse, Pr Gilles Colinet, Pr Sarah Garré, Dr Pierre Delaplace, Dr Déhou Dakuo et Dr Hamado Sawadogo, pour leurs sages conseils, orientations et le suivi de l'évolution de la thèse. Qu'ils sachent qu'ils ont toute ma gratitude pour le travail abattu ;
- au Pr Philippe Lejeune, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance et pour son accompagnement ;
- aux membres du jury Pr Charles Biolders, Pr Gilles Colinet, Pr Jérôme Yameogo, Dr Marie Dincher et Dr Bazoumana Koulibaly, pour l'intérêt porté à mon travail et pour leurs suggestions très précieuses. Je vous adresse à tous mes sincères remerciements. Le Pr Charles Biolders nous a consacré du temps pour mieux élucider certaines questions et suggestions qu'il avait porté dans le manuscrit de thèse lors de la défense privée ; nous lui remercions pour cette disponibilité et les conseils reçus.
- au Dr Hamado Sawadogo avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler et qui a suivi de bout en bout les travaux de terrain, la correction des premiers drafts d'article et de la thèse. Je tiens à le remercier pour sa constante disponibilité, ses encouragements, son aide et ses nombreux soutiens ;
- au Dr Louis Yaméogo pour son indispensable assistance en analyse de données ;
- aux Dr David Lefevre, Dr Victor Burgeon et M. Moussa Gnissien, experts du projet BIOPROTECHSOL, pour leur accompagnement dans la production du biochar, la facilitation des aspects administratifs et financiers de nos travaux ;
- à Dr Jean Marie Douzet du CIRAD, qui a gracieusement mis à notre disposition le logement des étudiants à Yilou et des documents sur les travaux réalisés à Yilou ;
- un grand merci à toute l'équipe des laboratoires EESP de Gembloux Agro-Bio Tech, SEP de Farako-Bâ, et LERF de l'UNB ; Emilie Marit, Raphaël Torantino, Beatrice Lagarde, Clémence Mariage, Amoro Ouattara, Zoumosé Bekuoné Somé, pour tous les bons moments passés ensemble au cours des manip ;

- à tous les étudiants qui ont contribué à la collecte des données. Il s'agit de Bacia K. Rabiadou, Ouedraogo A. Kadré, Rauw Chloé, Guiré Moussa, Coulibaly Bintou, Poda K. Robert, infiniment merci pour vos apports inestimables ;
- à mon responsable de programme, Dr Souleymane Ouédraogo, qui m'a généreusement accordé des facilités pour terminer cette thèse. Il nous a autorisé l'utilisation de parcelles, et de nombreuses facilités dans la conduite de nos travaux. Nous lui témoignons toute notre gratitude ;
- au Pr Yvonne Bonzi, avec qui j'ai vécu des expériences enrichissantes durant le programme de mentorat AWARD dont j'ai été lauréate au cours de ma thèse. Je lui suis reconnaissante pour l'aide précieuse qu'elle m'a apportée ;
- merci à mes merveilleux collègues du programme GRNSP, Bandaogo A. Alima, Traore Adama, Savadogo Maurice, Ouattara Baba, Ouedraogo Ibrahim, Sauret G. Elie, Fayama Tionyelé, Traore Issouf, Kamouni Ezonbié, Ouedraogo H. Adama, Yarga H. Paul, Da Aziz pour leurs soutiens multiformes pendant cette période de thèse et pour la bonne ambiance ;
- merci à mes co-doctorants, Cissé Drissa, Tarpilga C. Moussa, Ouedraogo Wendlassida et à Tiendrebeogo Assiata, Barry Fanta, de Tombeur Felix, pour leur amitié et pour toutes les bonnes discussions scientifiques que nous avons eues ;
- enfin, un grand merci à mes parents et à ma petite famille (Papa, Yasmine, Maya et Farid) dont les encouragements me furent précieux tout au long de ce parcours parfois difficile : merci pour tout le bonheur que vous me donnez. Tout ce que je suis, je le dois à vous tous ;
- toute ma gratitude aux braves producteurs de Koumbia et Yilou, pour avoir accepté de porter les essais en milieux paysans durant les trois campagnes d'expérimentation ;
- puisse Le Tout-puissant bénir abondamment chacun d'eux.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements	iv
Table des matières	vi
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiii
Chapitre 1. Introduction générale	5
1.1. Contexte et justification de l'étude	5
1.2. Objectifs et Hypothèses de la thèse	6
1.3. Cadre conceptuel de la thèse	7
1.4. Causes et conséquences de la dégradation des sols agricoles.....	11
1.5. Pratiques de restauration de la fertilité des terres dégradées	12
1.6. Gestion de la fertilité des sols par la fertilisation minérale et organique.....	14
1.6.1. Aperçu sur la pratique de la fumure organique	14
1.6.2. Aperçu sur la pratique de la fertilisation minérale.....	15
1.7. Pratiques d'optimisation de la fumure minérale.....	16
1.8. Gestion de la fertilité des sols par l'utilisation du biochar	20
1.8.1. Techniques de production de fertilisants à libération lente à base de biochar	23
1.8.2 Quelques effets bénéfiques de l'apport du biochar-SRF au sol	25
1.9. Conclusion partielle.....	26
1.10. Références bibliographiques.....	26
Chapitre 2. Activation du biochar pour produire un fertilisant à libération lente (<i>slow release fertilizer-SRF</i>) : une option de gestion efficiente des nutriments	39
Résumé	39
2.1. Introduction	39
2.2. Matériel et méthodes	41
2.2.1. Production et caractérisation du biochar.....	41
2.2.3. Technique de production de fertilisants à libération lente à base de biochar (biochar-SRF)	42
2.2.4. Evaluation de la capacité d'adsorption des nutriments par le biochar .	43
2.2.5. Test d'homogénéité des caractéristiques chimiques du biochar-SRF .	45
2.2.6. Suivi de la dynamique de relargage des nutriments du biochar-SRF ..	45
2.2.8. Evaluation de l'efficacité des trois types de biochar-SRF.....	46
2.2.9. Analyse des données.....	47

2.3. Résultats	47
2.3.1. Caractéristiques physico-chimiques du biochar de tiges de cotonnier	47
2.3.2. Caractéristiques initiales du biochar et du NPK utilisés.....	49
2.3.3. Evolution de la concentration élémentaire des nutriments dans le biochar-SRF.....	50
2.3.4. Résultats des tests d'homogénéité des caractéristiques chimiques du biochar-SRF.....	52
2.3.5. Capacité de relargage des nutriments à partir du biochar-SRF	54
2.3.6. Performance de la technique de production du biochar-SRF	57
2.3.7. Efficacité des biochars-SRF sur le maïs	59
2.4. Discussion	59
2.4.1. Caractéristiques élémentaires du biochar-SRF en fonction de la concentration de la solution NPK.....	59
2.4.2. Efficience du processus de production du biochar-SRF.....	61
2.4.3. Dynamique de relargage des nutriments du biochar-SRF	62
2.4.4. Efficacité agronomique des biochars-SRF en production de maïs	63
2.5. Conclusion partielle.....	64
2.6. Références bibliographiques	65
Chapitre 3. Effets de l'application du biochar-SRF sur le rendement du cotonnier et du maïs dans un système de rotation coton-maïs en milieu semi-contrôlé.....	73
Résumé	73
3.1. Introduction	74
3.2. Matériel et méthodes	75
3.2.1. Description du site expérimental	75
3.2.2. Variation interannuelle des précipitations et du rendement de coton...77	
3.2.3. Comparaison de l'état de fertilité du sol expérimental avec des sols de même type de la zone	78
3.2.4. Matériel végétal et fertilisants utilisés	81
3.2.5. Production et enrichissement du biochar en nutriments.....	81
3.2.6. Dispositif expérimental	82
3.2.7. Conduite de l'expérimentation.....	85
3.2.8. Mesure des paramètres agronomiques et échantillonnage de sol et de biomasse	85
3.2.9. Analyses physico-chimiques des échantillons.....	86
3.2.10. Evaluation de l'efficience d'utilisation de l'azote	87
3.2.11. Analyse des données	88

3.3. Résultats	88
3.3.1. Composition chimique des fertilisants utilisés	88
3.3.2. Dynamique libération des éléments nutritifs des biochars et du NPK	90
3.3.3. Effets des engrais à base de biochar sur la croissance des cultures	92
3.3.4 Effets des engrais à base de biochar sur les rendements des cultures...	94
3.3.5. Effets des fertilisants sur les propriétés chimiques du sol	95
3.3.6. Effets des fertilisants sur la nutrition minérale du maïs.....	98
3.3.7. Evolution de l'efficacité agronomique, de recouvrement et physiologique en fonction des traitements.....	99
3.4. Discussion.....	100
3.4.1. Dynamique de libération des nutriments des biochars-SRF et du NPK	100
3.4.2 Effets de l'apport du biochar sur les paramètres du sol.....	102
3.4.3. Relation entre les propriétés du sol, le rendement des cultures et l'efficacité d'utilisation des nutriments.....	103
3.5. Conclusion partielle.....	105
3.6. Références bibliographiques.....	105
Chapitre 4. Gestion efficace des nutriments par l'utilisation de fertilisants à libération lente à base de biochar (<i>slow release fertilizer</i> -SRF) dans un système <i>zai</i> au Centre-nord du Burkina Faso	114
Résumé	114
4.1. Introduction	114
4.2. Matériel et méthodes	116
4.2.1. Description du site expérimental	116
4.2.2. Matériel expérimental et fertilisants utilisés.....	117
4.2.3. Dispositif expérimental.....	117
4.2.4 Conduite de l'essai.....	120
4.2.5 Collecte des données	120
4.2.6. Echantillonnage et analyses physico-chimiques des sols	121
4.2.7. Analyses statistiques.....	122
4.3 Résultats	122
4.3.1. Propriétés des fertilisants utilisés.....	122
4.3.2. Evolution des paramètres chimiques du sol.....	125
4.3.3. Evolution de l'humidité du sol	126

4.3.4. Variation du diamètre et de la hauteur moyenne des tiges du sorgho en fonction des traitements.....	127
4.3.5. Rendements et poids de mille grains du sorgho	131
4.3.6. Plus-value de l'activation du biochar sur le rendement.....	133
4.4. Discussion	133
4.4.1. Effet du biochar sur l'évolution des paramètres chimiques du sol.....	133
4.4.2. Effet du biochar sur l'humidité du sol.....	135
4.4.3. L'effet de l'apport du biochar sur la croissance et les rendements du sorgho	136
4.4.4. Efficacité agronomique de l'activation du biochar.....	137
4.5. Conclusion partielle.....	137
4.6. Références bibliographiques	138
Chapitre 5. Discussion générale, conclusion, recommandations et perspectives.	145
5.1. Discussion générale.....	145
5.1.1. Optimisation de la fertilisation minérale par l'utilisation du biochar.	146
5.1.2. Mécanismes sous-jacents de l'efficacité du microdosage du biochar-SRF et du NPK.....	147
5.1.3. Réponse des paramètres du sol et des cultures aux engrais SRF à base de biochar	148
5.2. Conclusion Générale	150
5.4 Recommandations et perspectives.....	151
5.5. Références bibliographiques	154
Annexe	159

Liste des figures

Figure 1: Cadre conceptuel de la thèse	10
Figure 2: Carte de dégradation des terres du Burkina Faso (source ONEDD, 2013)	11
Figure 3: Terres nues ou zipellées du site de Yilou (Cliché F. Saba, 2022).....	12
Figure 4 : Cordons pierreux renforcés à l'aide de bandes enherbées (A) et trous de zai (B) (Cliché F. Saba, 2019)	13
Figure 5: Application de NPK par microdose sur le maïs (Cliché F. Saba, 2019)	18
Figure 6 : Résumé graphique du mécanisme de mise en place d'engrais enrobé (Lawrencía et al., 2021).....	20
Figure 7: Biochar de tiges de cotonnier (Cliché F. Saba, 2020).....	21
Figure 8: Composantes du système de biochar (Lehmann et Joseph, 2009).....	22
Figure 9 : Vue de la structure poreuse du biochar par l'analyse SEM (F. Saba, 2018)	23
Figure 10: Types de production de fertilisants à base de biochar (Rombel et al., 2022)	24
Figure 11: Schéma des étapes de la production et d'utilisation du biochar-SRF ...	42
Figure 12: Production (a) et séchage du biochar-SRF (b) (Cliché F. Saba, 2019)	43
Figure 13: Schéma des points d'échantillonnage du biochar-SRF pour le test d'homogénéité 1 : échantillons provenant de la 1 ^{ère} couche ou couche supérieure ; 2 : échantillons provenant de la 2 ^{ème} couche ou couche intermédiaire, et 3 : échantillons provenant de la 3 ^{ème} couche ou couche inférieure	45
Figure 14: Schéma de collecte séquentielle de lixiviats de biochar-SRF.....	46
Figure 15: Illustration par l'analyse SEM/EDX de la densité porale du biochar de tiges de cotonnier.....	48
Figure 16 : Localisation (1) : du phosphore, (2) : du potassium (3) du calcium et (4) du magnésium dans la matrice du biochar de tiges de cotonnier selon l'analyse SEM/EDX.....	49
Figure 17: Libération instantanée (a) et quantité cumulée (b) de nitrates, phosphates, potassium, calcium et magnésium (extrait à l'eau distillée et au 0,001M CaCl ₂) du NPK, du biochar-SRF et du biochar pristine pendant 504 heures	56
Figure 18: Localisation du site expérimental de la station de recherche de Farako- Bâ.....	76
Figure 19: Hauteurs d'eau mensuelle (mm) et nombre de jours de pluie à Farako-Bâ de 2018 à 2020 (source : station météo Cimel de Farako-Bâ).....	77
Figure 20: Indice pluviométrique et rendement moyen du coton de 2008 à 2018 (source de données : DRAAH-Hauts bassins).....	78
Figure 21: Etat de fertilité du sol expérimental comparé aux sols de mêmes types des sites de Koumbia et Massala	80
Figure 22: Schéma du dispositif expérimental de l'essai à la station de Farako-Bâ.	83
Figure 23: Dynamique de relargage des a) nitrates ; b) phosphates et c) potassium des trois fertilisants utilisés.....	91

Figure 24: Parcelles de coton et de maïs amendées avec du biochar-SRF et de NPK en microdose.....	92
Figure 25: Biomasse sèche des tiges et rendements en coton graine et maïs grain en fonction des traitements. Légende : Treatments = traitements, T0 = Témoin ; T1 = Pratique conventionnelle ; T2 = Microdose ; T3 = Biochar-SRF ; T4 =Biochar enrobé, Yield = rendement, Cotton biomass= rendement tige, cotton grain rendement grain de coton, maize biomass : rendement tige de maïs, maize grain : rendement grain de maïs.	95
Figure 26: Teneurs totales en carbone, azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium, sodium, et des feuilles de maïs de 60 JAS ; T0 : Témoin ; T1 : Pratique conventionnelle ; T2 : Microdose ; T3 : Biochar-SRF ; T4 : Biochar enrobé.....	99
Figure 27:Variation des paramètres de l'efficacité d'utilisation de l'azote T1 : Pratique conventionnelle ; T2 : Microdose ; T3 : Biochar-SRF ; T4 : biochar enrobé.	100
Figure 28 : Localisation du site expérimental de Yilou	117
Figure 29: Poquets de zaï contenant du biochar pristine (Cliché F. Saba, 2019).	120
Figure 30:Variation des paramètres chimiques du sol (C-organique, N-total, P, K, Ca et Mg) disponibles) entre l'état de référence avant l'installation de l'essai en 2018 et ceux après la campagne agricole de 2018 en fonction des traitements	126
Figure 31:Variation de l'humidité du sol des profondeurs 0-20 cm en fonction des amendements.....	127
Figure 32:Vue partielle d'une parcelle expérimentale microdose NPK (gauche) et microdose biochar-SRF (droite) au stade montaison (Cliché F. Saba, 2020)	128
Figure 33:Variation des rendements grains et paille du sorgho entre le traitement de référence T3 (Biochar-SRF) et les autres traitements à base du biochar (T1 &T4)	133

Liste des tableaux

Tableau 1: Concentrations des solutions de NPK utilisées pour la macération.....	43
Tableau 2: Quantités de N, P et K apportées par traitement et par pot.....	47
Tableau 3:Caractéristiques physico-chimiques du biochar de tiges de cotonnier .	48
Tableau 4 : Composition chimique initiale du biochar pristine et du NPK utilisés pour produire le biochar-SRF	50
Tableau 5 : Concentrations moyennes en éléments totaux et bio disponibles des biochars-SRF en fonction de la concentration initiale de la solution NPK	51
Tableau 6 : Concentration élémentaire moyenne en éléments totaux et biodisponibles du biochar-SRF suivant les différentes couches.....	53
Tableau 7: Proportion des nutriments perdus à travers le reliquat de la solution de macération du biochar	57
Tableau 8: estimation des niveaux d'adsorption et de pertes théoriques de nutriments au cours de l'activation.....	58
Tableau 9 : Hauteur, poids sec des racines et biomasse aérienne moyens par plant de maïs à 45 JAS en fonction des traitements	59
Tableau 10 Caractéristiques physico-chimiques du sol à la mise en place de l'essai (Farako-Bâ).....	79
Tableau 11:Teneurs en éléments nutritifs du biochar pristine de la gomme arabique et du compost utilisés dans l'expérience	81
Tableau 12: Composition des traitements, et quantités de N, P et K apportées par type de fertilisants et par traitement.....	84
Tableau 13 : Caractéristiques chimiques du biochar-SRF, du biochar enrobé et du NPK utilisés comme fertilisants pour l'expérimentation.....	89
Tableau 14 : variation des hauteurs moyennes des plants du cotonnier et du maïs de 2018 à 2020 en fonction des traitements	93
Tableau 15: Teneur en éléments nutritifs, en carbone et le pH du sol en fonction des traitements appliqués.	97
Tableau 16: Composition des traitements et quantités de N, P et K apportées sur le dispositif de Yilou en fonction des traitements	119
Tableau 17 : Caractéristiques physico-chimiques du sol avant la mise en place de l'essai.....	122
Tableau 18 : Caractéristiques chimiques du compost, biochar et NPK utilisés comme fertilisants.....	124
Tableau 19 : Variation du diamètre du sorgho en fonction des traitements au cours des campagnes agricoles 2019 et 2020.....	129
Tableau 20 : Variation de la hauteur des plants de sorgho en fonction des traitements au cours des campagnes agricoles 2019 et 2020.....	130
Tableau 21 : Variation des rendements moyens et poids de mille grains de sorgho en fonction des traitements	132

Liste des abréviations

ANOVA : Analysis of Variance (Analyse de variance)
ARES : Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur
AWARD: African Woman in Agriculture Research and Development
BIOPROTECHSOL : Amélioration durable de la fertilité des sols du Burkina Faso par amendement raisonné en matières organiques et biochar
BUNASOLS : Bureau National des Sols
Ca : Calcium
CEC : Capacité d'Echange Cationique
C/N : rapport Carbone/Azote
CEN : Comité Européen de Normalisation
CNS : Comité National des Semences
FCFA : Franc de la Communauté Financière Africaine
CRF : Controlled Release Fertilizer
CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CSAO : Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest
EESP : Echange Eau Sol Plante
FIDA : Fonds International de Développement Agricole
FAO : Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GRNSP : Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production
H₂O : Eau
Ha : Hectare
INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
INSD : Institut national de la statistique et de la démographie
IUSS : International Union of Soil Sciences (Unionots)
MAAH : Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles
MAAHA : Ministère de l'Agriculture et des Aménagements HydroAgricoles
JAS : Jour Après Semis
Mg : Magnésium
NPK : Nitrogen, Phosphorus Potassium
ONEDD : Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable
PIB : Produit Intérieur Brut
SEP : Sol Eau Plante
SPAAA : Suivi des Politiques Agricoles et Alimentaires en Afrique
SRF : Slow Release Fertilizer
UNB : Université Nazi BONI
ULiège : Université de Liège
WHC: Water Holding Capacity
WRB: Word Reference Base

Chapitre 1

Introduction générale

Chapitre 1. Introduction générale

1.1. Contexte et justification de l'étude

En Afrique subsaharienne, l'agriculture constitue le principal secteur pourvoyeur d'emplois et de devises pour des millions de personnes. Cependant, les indicateurs de performances agricoles montrent un déséquilibre entre l'augmentation de la demande en produits agricoles liée à la croissance démographique, et l'offre réelle de production agricole (Fairhurst, 2015). Cette faible performance du secteur agricole est principalement liée à la baisse de la fertilité des sols, et aux difficultés d'accès aux crédits et intrants agricoles en quantité et en qualité nécessaires pour améliorer la productivité des sols pauvres (Traoré et al., 2020).

Au Burkina Faso, le secteur agricole emploie plus de 80% de la population active, et sa contribution au produit intérieur brut était estimé à 18,48% en 2021 (INSD, 2022). Malgré son importance, les rendements moyens des principales cultures restent faibles, et stagnent au cours des années. En dehors des caractéristiques inhérentes des sols défavorables, les pratiques agricoles inappropriées et les faibles apports de matières organiques constituent des facteurs qui aggravent la détérioration de la qualité physique, chimique et biologique des sols, et conduisent à une réduction de leur pouvoir productif (Belemvire et al., 2008).

La fertilisation minérale est l'une des pratiques couramment utilisées par les petits producteurs pour améliorer les rendements agricoles sur des sols pauvres. Cependant, la cherté des engrais et leur faible disponibilité dans les zones de production, limitent leur accès en quantités nécessaires pour améliorer efficacement la productivité de leur culture (Barbier, 2009 ; FIDA, 2019). Un petit producteur est un producteur dont la structure ne dépend pas de main-d'œuvre salariée permanente, et qui gère ses activités de production à l'aide d'une main-d'œuvre essentiellement familiale. Malgré que les initiatives nationales de subvention des engrais minéraux aient permis d'augmenter les doses utilisées par hectare, cela ne s'est pas traduit par une augmentation substantielle des rendements agricoles, du fait de la faible efficacité d'utilisation des nutriments par les cultures (Sabo et al., 2010; MAAHA, 2021).

De plus, l'application exclusive et massive d'engrais minéraux conventionnels améliore certes la production agricole, mais entraîne de graves problèmes environnementaux et des charges économiques importantes. En effet, des travaux antérieurs ont clairement démontré que la pratique de la fumure minérale exclusive dans des systèmes de culture continue et sans restitutions organiques, constitue des pratiques non durables de restauration de la fertilité des sols, car elle accélère l'acidification et intensifie la perte de matière organique estimée entre 2 à 4% par an (Bonzi et al., 2008; Koulibaly et al., 2015). Ces différentes formes de pertes pourraient engendrer à la longue des pollutions environnementales, et nuire aux chaînes alimentaires (Ngatia et al., 2019). Au regard des nombreuses limites soulevées par cette pratique, la microdose qui est une technique d'apport localisé de petites quantités d'engrais minéraux, a été vulgarisée en Afrique sub-saharienne comme pratique innovante pour améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments et accroître le rendement agricole avec des quantités modestes (Ibrahim et al., 2015; Mensah et al., 2016). Les rendements spectaculaires liés à la pratique de la microdose ont été

attribuées à la bonne disponibilité et à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments par les plantes, du fait de leur concentration dans le système racinaire des plantes et à la réduction des différentes formes de pertes (Tabo et al., 2011; Ibrahim et al., 2016). Malgré cette bonne performance, son adoption a été limitée par sa forte demande en main d'œuvre, des tentatives de mécanisation peu réussies et le faible accès aux engrais (Sanogo et al., 2020). L'utilisation des engrais à libération lente (connus sous la terminologie « *slow release fertiliser*-SRF ») à base de biochar, pourrait bien contribuer à lever ces contraintes notamment à réduire les doses d'engrais et le nombre d'application grâce à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments et favoriser par conséquent, une adoption massive de cette technologie promue. Les formulations à libération lente sont des engrais qui retardent la disponibilité des nutriments pour l'absorption par les plantes après l'application (Trenkel, 2010), permettant de fait de prolonger leur disponibilité pour les cultures.

Le biochar, un sous-produit de la pyrolyse de biomasses, pourrait potentiellement améliorer le statut organique du sol, la séquestration du carbone, et optimiser la fertilisation minérale nécessaire pour soutenir les productions agricoles dans les sols pauvres (Lehmann, 2007; Lehmann & Joseph, 2009). Dans les sols tropicaux dégradés, le biochar peut avoir un effet chaulant qui réduirait temporairement l'acidité du sol tout en améliorant la rétention des nutriments dans les sols à haut potentiel de lixiviation (Gwenzi et al., 2018). Les rendements élevés de ces sols amendés avec le biochar, ont été expliqués par la rétention en eau, des nutriments et la stabilisation de la matière organique dans des environnements où les taux de minéralisation sont très élevés. En effet, grâce à sa structure poreuse, sa grande surface spécifique et à la présence de groupes fonctionnels, le biochar est capable d'adsorber et de réguler la libération des nutriments dans le sol (Cheng et al., 2017; Schmidt et al., 2017; Boguta et al., 2019). L'adsorption est un phénomène physico-chimique interfacial réversible provoquant la fixation d'une substance sur une surface (d'un matériau adsorbant filtrant) ou l'accumulation des molécules de soluté dans l'interface solide-liquide. Ces propriétés font du biochar un bon support des nutriments pour la production de fertilisants à libération lente, ou biochar-SRF. L'efficacité du biochar-SRF comparé aux engrais minéraux, serait liée au faible taux de dissolution des nutriments initialement adsorbés ou diffusés dans la porosité, qui permet au biochar-SRF d'agir comme source de nutriments sur une période plus longue pour les plantes.

Dans la zone soudanienne du Burkina Faso, les résidus culturels comme les tiges de cotonnier, sont peu valorisés et généralement brûlés sur place pour libérer les espaces cultivables en début de l'hivernage. Ces résidus peuvent être recyclés sous forme de biochar, et servir à la production d'engrais-SRF et vulgarisés comme alternative aux fertilisants minéraux de synthèse couramment utilisés par les petits producteurs, pour accroître durablement la productivité des cultures et des sols dégradés.

1.2. Objectifs et Hypothèses de la thèse

L'objectif global de cette thèse est de contribuer à la gestion durable des sols, par l'utilisation combinée des fertilisants à base de biochar issu de ressources organiques disponibles localement et peu valorisées et par microdose.

Il vise notamment à i) produire et caractériser le taux d'adsorption et de relargage des nutriments par le biochar-SRF ; ii) évaluer l'efficacité de l'apport de biochar-SRF issu de deux types d'activation sur les rendements de coton et maïs, les paramètres chimiques du sol, et l'efficacité d'utilisation des nutriments ; iii) évaluer l'effet de l'application du biochar activé ou non, sur le rendement du sorgho et l'évolution à court terme des paramètres chimiques du sol dans un système à base de *zai*. Ces objectifs sont liés aux questions de recherche suivantes auxquelles nous avons tenté d'apporter des éléments de réponse au moyen de nos activités de recherche.

Q1) Quel serait l'effet de la variation de la concentration de la solution de NPK mélangée avec le biochar sur les propriétés physico-chimiques des biochars-SRF produits, notamment son taux d'adsorption des nutriments et le niveau de pertes observées durant le processus ? Quelle serait alors la dynamique de relargage des éléments adsorbés au cours de la macération ?

Q2) Au cas où la réponse à la variation de la solution nutritive était positive, quel serait alors l'impact d'un éventuel enrobage du biochar-SRF de gomme arabique sur les rendements des cultures associées, les paramètres chimiques du sol, et l'efficacité d'utilisation des nutriments ?

Q3) Quel serait l'impact de l'apport du biochar de tiges de cotonnier chargé avec une solution de NPK, sur la restauration de la productivité des sols dégradés et les rendements du sorgho en système *zai* sous climat semi-aride, comparativement à l'application microdose de NPK ?

Les réponses à ces questions contribueront à mieux connaître les fertilisants à libération lente à base de biochar et ses interactions avec l'environnement, et la possibilité de les utiliser comme un outil de lutte contre la baisse de la fertilité des sols au Burkina Faso. Les réponses à ces questions sont appréhendées sur deux approches d'expérimentations : des tests au laboratoire, et en terre pleine en station de recherche et en milieu paysan en, s'appuyant sur les hypothèses suivantes :

H1 : La concentration de la solution de NPK utilisée au cours de l'activation du biochar, influence la teneur en nutriments du biochar-SRF et le relargage des nutriments adsorbés ;

H2 : L'enrobage du biochar-SRF avec la gomme arabique améliore l'efficacité d'utilisation des nutriments et les rendements des cultures associées par rapport au biochar-SRF simple, grâce au renforcement du mécanisme de libération lente ;

H3 : Les propriétés adsorbantes et de libération lente acquises par l'activation (biochar-SRF), optimise la disponibilité des nutriments pour les cultures et permet de relever la qualité des sols dégradés et les rendements des cultures à court terme

H4 : Du fait des effets positifs de l'activation sur la qualité du biochar, les effets de l'application de petites quantités de biochar-SRF dans les poquets de *zai* sont plus élevés qu'une simple adjonction du biochar aux engrais NPK.

1.3. Cadre conceptuel de la thèse

Le faible niveau de fertilité des sols est l'un des principaux facteurs explicatifs des faibles rendements agricoles, et de l'insécurité alimentaire croissante au Burkina Faso. Des décennies de pratiques conventionnelles de fertilisation ont montré leur limite,

due aux difficultés d'acquisition des engrais et leur faible impact sur les paramètres agro pédologiques à court et moyen termes. Il convient donc de proposer une alternative durable pour restaurer et maintenir la productivité des sols à travers le recyclage de biomasses agricoles disponibles et accessibles aux petits producteurs, tels que les tiges de cotonnier, les balles de riz, les rachis de maïs etc. Dans un contexte de climat changeant, les solutions proposées devraient à la fois contribuer à l'amélioration de la séquestration du carbone et l'efficacité de l'eau au champ. C'est dans cette dynamique que les universités Nazi BONI de Burkina Faso et de Liège en Belgique, ont acquis un financement pour la mise en œuvre du projet *Amélioration durable de la fertilité des sols du Burkina Faso par amendement raisonné en matières organiques et biochar* (BIOPROTECHSOL). Ce projet vise à améliorer durablement la fertilité des sols par l'utilisation des amendements organiques comme le biochar issu du recyclage des résidus culturaux peu valorisés (tiges de cotonnier, rachis de maïs, balles de riz, etc.). La mise œuvre de ce projet a permis d'évaluer les bénéfices agronomiques et socio-économiques de l'utilisation des amendements à base de biochar, de renforcer des capacités des petits producteurs à travers la formation des bénéficiaires à la production et l'utilisation de ces amendements et des fours à pyrolyse, de former des artisans locaux à la construction de fours à pyrolyse, et enfin, d'évaluer les avantages liés aux apports du biochar combiné à la microdose des engrais minéraux (objet de la présente thèse). Les travaux de recherche de cette thèse visent à améliorer les connaissances sur l'utilisation du biochar comme nouvelle technologie pour améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments via l'adsorption des nutriments par macération (biochar-SRF) et leur libération lente après application au champ. Les préoccupations scientifiques liées à l'introduction du biochar-SRF, peuvent être résumées en une question centrale de recherche qui est : quels sont les bénéfices de l'introduction du biochar dans les systèmes de production du Burkina Faso, tant du point de vue agronomique que pédologique ? Pour y répondre, nous structurerons notre démarche autour des questions de recherche susmentionnées. Ces questionnements font partie d'une approche intégrée mise en place par le projet BIOPROTECHSOL pour identifier les axes de vulgarisation du biochar chez les petits producteurs. Ainsi, à travers ces axes, la facilitation de l'accès au biochar a été appréhendée à travers la mise au point de différents types de fours à pyrolyse à grande échelle et des fours multifonction à usage domestique. Une partie de l'optimisation de l'utilisation des nutriments par les plantes a été abordée par l'incorporation du biochar dans le tas de compost pour produire du co-compost. Le dernier volet de cette recherche globale s'est attaqué aux déterminants de l'introduction du biochar dans les agrosystèmes du Burkina Faso, à travers une analyse spatiale et socio-économique de l'implémentation d'un amendement biochar dans la zone ouest.

La restitution des résultats de ces travaux est organisée en cinq chapitres. Le chapitre 1 porte sur l'introduction générale, et est consacré à la revue de littérature. Ce chapitre donne un aperçu du contexte et la justification de l'étude, l'état de l'art, les objectifs et les questions de recherche de cette étude. Il aborde notamment la problématique de la dégradation des sols de façon générale, et particulièrement celle des sites expérimentaux, les options de recyclage des nutriments en lien avec le contexte pédologique et climatique du Burkina Faso. Il se poursuit avec une présentation des pratiques de fertilisation, pour se focaliser sur la nécessité de trouver une alternative

durable aux modes de fertilisation traditionnels à travers le recyclage des tiges de cotonnier sous forme de biochar. Le chapitre 2 traite de la production et la caractérisation du biochar-SRF obtenu après macération dans une solution NPK à concentration croissante. Le chapitre 3 porte sur l'évaluation des bénéfices agronomiques et pédologiques de l'apport biochar-SRF issu de deux procédés d'activation (avec ou sans ajout de gomme arabique) en milieu contrôlé à la station expérimentale de Farako-Bâ (INERA). Le chapitre 4 évalue les effets du biochar sous un climat semi-aride, et sa contribution à la restauration des terres dégradées dans un système de culture à base de *zaï*. Le dernier chapitre discute les résultats obtenus, donne la conclusion générale, et propose les perspectives de l'étude. La démarche scientifique de la thèse est résumée dans la figure 1.

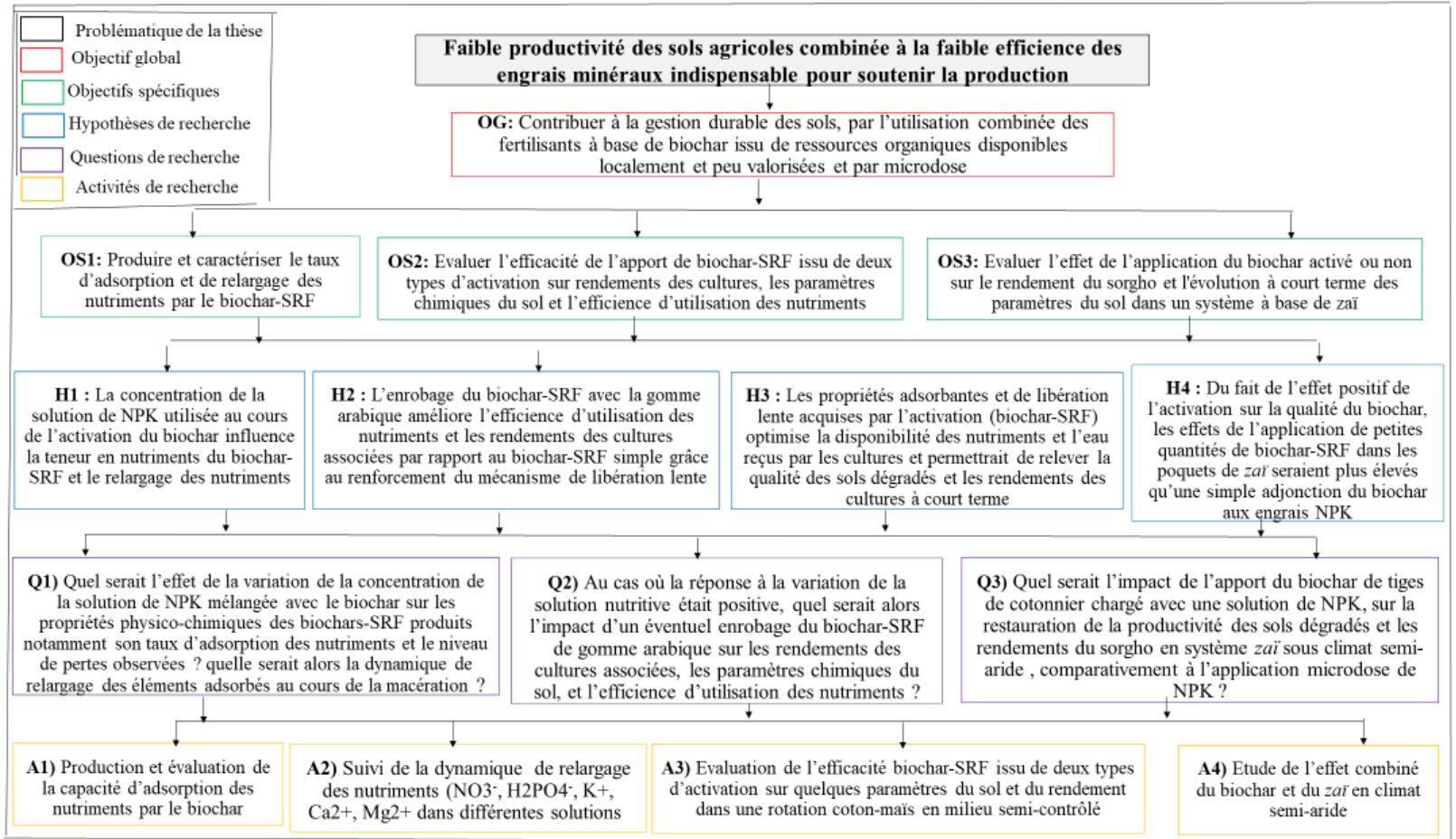


Figure 1: Cadre conceptuel de la thèse

1.4. Causes et conséquences de la dégradation des sols agricoles

Depuis plusieurs décennies, les pays de l'Afrique subsaharienne font face à une accentuation de la dégradation des terres cultivées. Ce phénomène, en plus des effets néfastes des changements climatiques, constitue un véritable frein à l'accroissement de la production agricole. Au Burkina Faso, les sols subissent de fortes dégradations qui se traduisent par une baisse de leur teneur en nutriments et une diminution de la productivité agricole. Cette dégradation touche l'ensemble des zones agroécologiques à des degrés différents (Figure 2). Les principales causes de cette dégradation des sols, en plus de l'érosion et des effets de la variabilité climatique, sont liées aux activités anthropiques telles que la mise en culture continue avec un faible retour des exportations, la déforestation, le surpâturage, et le travail excessif du sol etc. (Beaudet, 1992; Sawadogo et al., 2008). Elle se manifeste principalement par des pertes de la biodiversité, l'épuisement du stock organique et des nutriments, et la baisse des microorganismes du sol.

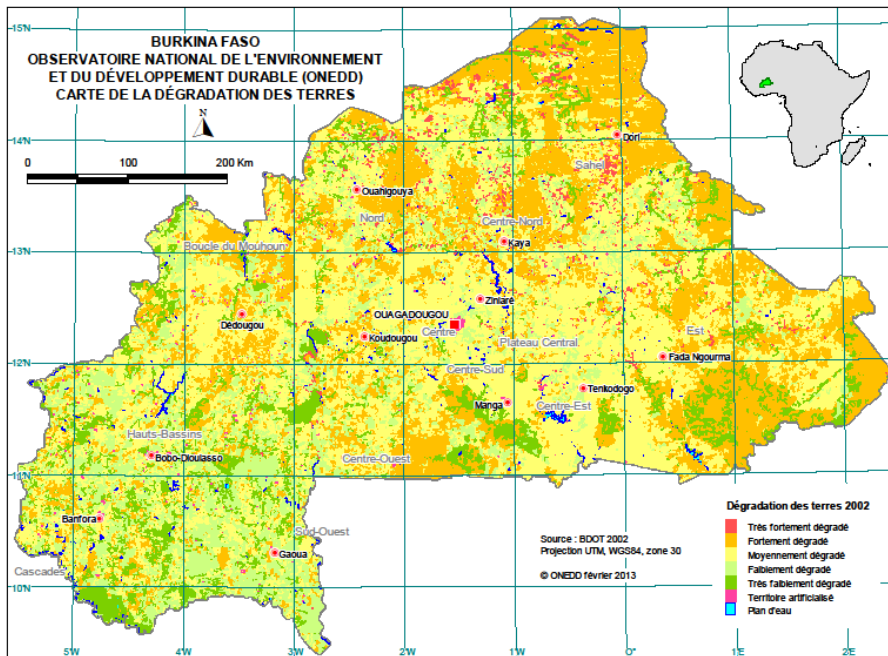


Figure 2: Carte de dégradation des terres du Burkina Faso (source ONEDD, 2013)

Dans la partie sahélienne du pays, la dégradation des sols se manifeste par un dépérissement et/ou la raréfaction du couvert végétal, qui aboutissent à la formation des espaces nus communément appelés *zippela* en langue locale mooré (Figure 3). Ce sont des sols cuirassés, lessivés de leurs nutriments, à haut taux d'altération, et difficiles à travailler étant donné la cuirasse ferrallitique, donc inaptés à l'activité

agricole (Sawadogo, 2011). En plus des propriétés inhérentes défavorables, la dénudation des sols est exacerbée par la poursuite de l'agriculture minière avec l'impossibilité d'assurer une culture de couverture hors de la saison des pluies (Millogo et al., 2017). Le contexte actuel du climat sahélien est marqué par des épisodes répétitifs de sécheresse, qui, combinés à un contexte pédologique défavorable, ont accentué la dégradation des sols et la migration de la culture de coton, principale culture de rente, vers la partie ouest du pays (CSAO, 2005).



Figure 3: Terres nues ou zipellées du site de Yilou (Cliché F. Saba, 2022)

Dans la zone soudanienne de l'ouest du Burkina Faso, les surfaces cultivables jadis fertiles, ont connu une baisse notable de leur superficie et de leur fertilité suite aux pressions anthropiques provoquées par l'installation de nombreux migrants. Les sols relativement plus productifs dans cette zone que ceux du centre du pays, commencent à manifester les signes de carences en nutriments, du fait de la surexploitation et des mauvaises pratiques de gestion de la fertilité (Pouya et al., 2020). Les pressions dues au développement de l'élevage et les exportations des résidus culturaux au profit du bétail et comme source d'énergie de cuisson, induisent un appauvrissement rapide de ces sols avec pour conséquences la baisse des rendements agricoles et des crises alimentaires répétitives (Vall et al., 2006; Blanchard et al., 2017).

1.5. Pratiques de restauration de la fertilité des terres dégradées

L'impact négatif de la dégradation des terres sur la sécurité alimentaire et leur restauration, coûtent extrêmement chers à l'état Burkinabè (MAAH, 2018; Traore & Requier-Desjardins, 2019). Les superficies des terres dégradées sont estimées à plus de six millions d'hectares, et les coûts nécessaires pour leur restauration sont estimés à environ 345 milliards de franc CFA (1 € = 655,957 francs CFA) pour la période 2020-2022 (MAAH, 2019). Les terres agricoles sont constamment fragilisées par l'érosion et la faible compensation des nutriments exportés par les récoltes via des

apports organiques insuffisants et de faible qualité sur un substrat naturellement pauvre en éléments minéraux et en matière organique (Pallo et al., 2008). La mauvaise gestion de la fertilité réduit d'autant plus la capacité de production sur ces sols et sont l'un des principaux facteurs de la variabilité des récoltes d'une année à l'autre, et donc de la précarité du monde rural (Pouya et al., 2020). La protection des terres contre la dégradation a toujours été une ligne maitresse des politiques nationales en faveur du développement du secteur agricole (Traoré et al., 2020). Celle-ci a connu plusieurs étapes successives avant de connaître un tournant décisif à partir de 1970, marquant en effet le premier paradigme de la gestion des fertilités des sols surtout après la grande sécheresse qu'a connu le pays (Kabore et al., 2017). Au centre du pays, les actions étaient orientées contre la dégradation physique des sols à travers de vastes chantiers de maillages du territoire par des cordons pierreux, et l'introduction du *zai* et des demi-lunes dans les systèmes agricoles (Figure 4). À l'ouest du pays, les producteurs ont commencé à utiliser le complexe NPK avec l'instauration de la culture du coton, dans le but d'accroître la production (Diarisso et al., 2016). À partir de cet instant, la gestion de la fertilité des sols était devenue une pratique essentielle perpétuée pour assurer la durabilité des systèmes de production (Millogo, 2002). Dès lors, les rotations et associations culturales avec des légumineuses, la gestion des résidus culturaux, les apports d'amendements externes tels que les fumiers, les composts, les engrais minéraux, etc.), la gestion des eaux à l'échelle de la parcelle et le travail du sol, ont été largement étudiés et vulgarisés auprès des petits producteurs (Sawadogo et al., 2009; Traoré et al., 2012).

L'amélioration de la fertilité du sol vise essentiellement à créer des conditions nutritives nécessaires pour répondre convenablement aux exigences de la culture, en y créant aussi des conditions propices (humidité, aération) à leur absorption par les plantes. Dans les pratiques actuelles des producteurs Burkinabè, les techniques de gestion de la fertilité peuvent se regrouper en deux principaux volets : les mesures conservatoires des sols, et les apports de fertilisants organiques et minéraux ou l'association des deux.

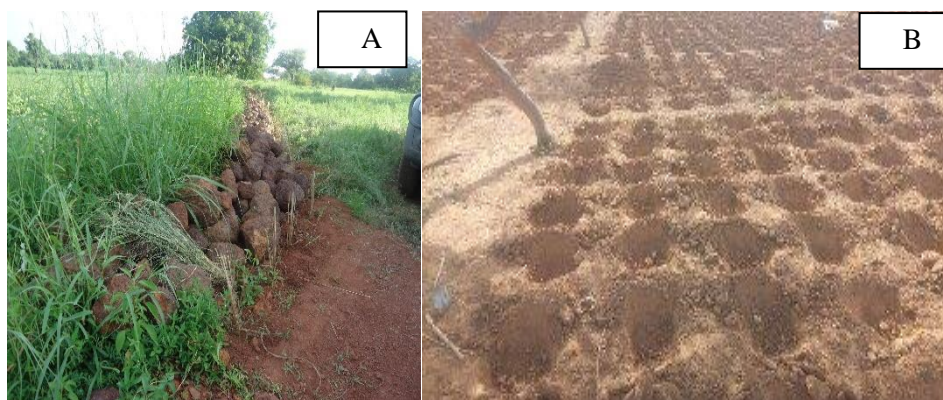


Figure 4 : Cordons pierreux renforcés à l'aide de bandes enherbées (A) et trous de *zai* (B) (Cliché F. Saba, 2019)

1.6. Gestion de la fertilité des sols par la fertilisation minérale et organique

Au Burkina Faso, trois grands types de fumure sont pratiqués par les producteurs. Il s'agit de la fumure organique, la fumure minérale exclusive, et la fumure organo-minérale qui est l'association des deux premiers. Plusieurs initiatives locales telles que les subventions d'engrais minéraux et du Burkina phosphate, la construction de fosses fumières et des formations intensives des producteurs sur les techniques de compostage, des soutiens à la mise en place d'unités de méthanisation de la matière organique (biogaz), ont été mises en œuvre pour promouvoir chaque pratique à travers des programmes de développement (Sabo et al., 2010). Ces initiatives ont eu un impact positif sur le taux d'utilisation des engrais en fonction des zones, mais leurs effets sur les rendements sont mitigés (MAAHA, 2021). Par exemple, la promotion de la fosse compostière a eu des effets positifs sur l'adoption de la fumure organique dans certaines zones, surtout dans le nord du pays, où le besoin de restaurer les sols était crucial (Diabagate, 2006).

1.6.1. Aperçu sur la pratique de la fumure organique

Au Burkina Faso, la dégradation des sols s'accompagne généralement d'une baisse de la teneur en matière organique (<1%) et des nutriments essentiels du sol donc de leur fertilité, compromettant ainsi la durabilité des agrosystèmes. Or la matière organique constitue non seulement, une source et un réservoir de nutriments, mais joue également un rôle fondamental dans le maintien de la fertilité des sols tropicaux, via la formation d'associations organo-minérales et d'agrégation. De ce fait, la fumure organique est une pratique essentielle au maintien de la qualité du sol. En effet, une fumure organique adaptée stimule et entretient les microorganismes indispensables au bon fonctionnement des cycles biogéochimiques des éléments, et contribue à la formation d'agrégats stables et au développement du complexe d'échange cationique du sol (Houot, 2020). Elle permet aussi de renforcer les stocks nutritifs du sol à travers la minéralisation, qui transforme la matière organique du sol en éléments minéraux assimilables par les plantes (Somda et al., 2017). Il a été reconnu que l'entretien du bilan organique des terres cultivées est un gage de durabilité des systèmes de production. En effet, la diminution en matière organique augmente la sensibilité du sol à l'acidification, à l'érosion, et entraîne une faible valorisation des engrais minéraux (Koulibaly et al., 2010; Blanchard et al., 2017; Bacye et al., 2020).

Malgré son importance, la pratique de la fumure organique reste faible et limitée par des facteurs socio-économiques dont les coûts liés à sa production, la diversité de leurs sources et leur faible qualité nutritive. En effet, dans la pratique des producteurs Burkinabè, on rencontre une grande diversité d'amendements pouvant être classés dans ces trois grands groupes : les amendements provenant de biomasses recyclées ou non (compost, paillage des résidus culturaux), les déjections d'animaux (poudrettes de parcage, fumier, fientes de volailles, lisiers et purins), et les déchets urbains solides. En plus des aspects liés à leur qualité, il faut noter que les recommandations en matière de fumure organique n'ont pas été mises à jour pendant longtemps, et les doses appliquées sont restées uniques dans la sous-région, quel que soit le type de sol. Ce

manque de recommandation spécifique a conduit à des pratiques atypiques de fumure organique dans la zone cotonnière de l'ouest, en fonction de la typologies des exploitations. Blanchard et al. (2017) soutiennent que les doses utilisées dans cette zone, estimées entre 1 et 40 t/ha/an, sont souvent inadaptées au type de sol et de qualité médiocre pour produire des effets significatifs à court terme. Par ailleurs, les apports des déchets urbains provenant des dépotoirs sauvages courant en maraichage et en agriculture péri-urbaine car peu coûteux, peuvent induire des pollutions aux métaux lourds et la prolifération de maladies et mauvaises herbes (Blanchard et al., 2017). Les coûts élevés de la production du compost combinés aux effets lents sur les rendements, constituent des freins à l'adoption à grande échelle de la fumure organique par les petits producteurs.

Malgré les difficultés mentionnées, la pratique de la fumure organique reste incontournable car la matière organique constitue le pivot de la fertilité des sols tropicaux. Les effets positifs de l'incorporation des amendements organiques au sol et sur la production agricole, ont été largement documentés (Bado et al., 1997; Bonzi et al., 2008; Somda et al., 2017). Même en faible quantité, l'apport de matière organique permet de réduire la sensibilité du sol à la dégradation tout en augmentant l'efficacité d'utilisation des fertilisants minéraux et par conséquent, entraîne une amélioration de la capacité productive des sols. Ces effets bénéfiques sur les rendements observés dans les sols tropicaux sont liés à sa capacité à fixer et restituer les éléments nutritifs, ce qui limite de fait leurs pertes et augmente leur disponibilité pour les plantes (Bonzi et al., 2008; Lompo et al., 2008).

1.6.2. Aperçu sur la pratique de la fertilisation minérale

La fertilisation minérale est considérée comme une des solutions rapides pour remédier aux carences en nutriments dans les sols pauvres. Elle permet d'apporter immédiatement les éléments minéraux nécessaires au développement des plantes, en tenant compte de l'offre potentielle du sol et les besoins des cultures (Fairhurst, 2015). Son usage est certes bénéfique car il augmente la productivité des cultures, mais son coût élevé entrave encore son utilisation par les petits producteurs. En effet, les prix des engrais minéraux notamment azotés sont souvent soumis à la hausse tendancielle des prix de l'énergie ; ce qui conduit à des augmentations fréquentes de leur coût, contrairement à l'évolution des prix des denrées alimentaires. En plus de leurs coûts, il y a aussi que les points de vente des engrais minéraux sont généralement concentrés dans les centres urbains au détriment des zones de production (Bationo et al., 2007; Sanogo et al., 2020). Notons également que l'absence de formulations d'engrais spécifiquement adaptées aux céréales est un handicap sérieux, et pourrait être l'une des causes des faibles rendements observés dans nos systèmes de culture (Negash & Bekele, 2017). Cette situation est aggravée par l'inefficacité du mécanisme de contrôle de la filière des engrais, ce qui engendre la mise sur le marché de produits de qualité douteuse et dont les dosages renseigné par les fournisseurs sont généralement en deçà de la qualité réelle du produit (Bikienga, 2002; Blondiau, 2018).

Les facteurs susmentionnés occasionnent le rationnement des engrais et le non-respect des doses recommandées, et participe à la pratique de différents régimes de fertilisations pour la même culture dans les mêmes types de sols et font que les apports d'engrais ne sont pas toujours suivis d'augmentation de rendements (Pouya et al.,

2013). Ainsi, à l'image des autres zones cotonnières, sept régimes de fertilisation ont été identifiés dans la zone cotonnière de l'ouest, dont la plupart était inefficace et pouvait engendrer des baisses de rendements en coton graine de l'ordre de 35-90% et de 20 à 40% pour la zone cotonnière du Centre par rapport aux ceux obtenus sous la dose recommandée (Pouya et al., 2013). Même dans les systèmes de production où les dosages des engrais sont respectés, les rendements sont globalement faibles par rapport au potentiel de rendement de la culture. Cette faible performance est liée à la faible efficacité d'utilisation des nutriments par les plantes. Épandu généralement en surface, cette technique d'application des engrais minéraux augmente les pertes de nutriments par ruissellement, par lixiviation et le risque de volatilisation d'ammoniac à la suite de l'apport d'engrais azotés, et accentue de ce fait, les impacts négatifs des engrais minéraux sur l'environnement. Pour les formes azotées, ces pertes sont estimées à plus de 65% en riziculture irriguée (Bandaogo et al., 2015). Par ailleurs, il est reconnu que les apports exclusifs d'engrais minéraux sont peu adaptés aux sols tropicaux sensibles à la lixiviation, et peuvent accélérer l'acidification des sols et compromettre leurs réponses aux engrais à long terme (Bonzi et al., 2008; Bacye et al., 2020). Selon Bonzi et al. (2008), l'apport d'engrais azotés seuls occasionnait des pertes de 2 à 2,8% de matière organique dans le sol par an dans l'ouest du Burkina Faso, dues à la stimulation de la minéralisation. Compte tenu du rôle important de la fumure minérale, il convient de développer des stratégies permettant d'optimiser les petites quantités accessibles aux petits producteurs.

1.7. Pratiques d'optimisation de la fumure minérale

Le bas niveau de la fertilité des sols agricoles rend obligatoire le recours aux engrais minéraux pour soutenir la production. Cependant, la cherté de ces engrais et l'instabilité de leur prix par rapport aux opportunités de marché des produits agricoles, constituent des obstacles à leur adoption et au respect des doses à même d'accroître les rendements (Mwinuka et al., 2017). A cela, s'ajoute l'augmentation des risques de retour sur l'investissement causés par les aléas climatiques. Le défi majeur de la fertilisation minérale est de pouvoir garantir un rendement élevé avec des quantités modestes d'engrais, tout en préservant la qualité des sols. Cela passe par la mise en œuvre des techniques qui permettent l'optimisation de petites quantités.

Diverses stratégies sont utilisées pour accroître l'efficacité des engrais minéraux, parmi lesquelles le fractionnement des apports, l'association d'engrais minéral et amendements organiques, les apports localisés de petites quantités d'engrais ou microdose, la fertilisation de précision à travers les systèmes d'irrigation goutte à goutte, l'utilisation d'engrais à libération lente ou contrôlée, et les engrais avec additifs destinés à diminuer les pertes tels que le blocage de nitrification (Trenkel, 2010; Duhan et al., 2017; Benlamlih, 2019). Les techniques d'apports localisés dans le sol à proximité des racines, le long de la ligne de semis, ou en bandes latérales entre les lignes de semis, est l'une des techniques qui améliorent le recouvrement des éléments nutritifs par les plantes et réduisent le risque de pertes par volatilisation des engrais azotés. Au Burkina Faso, en plus de la fumure organo-minérale, la microdose a été introduite dans les années 90 à cet effet, comme solution palliative pour améliorer l'accès aux engrais pour les petits producteurs.

1. 7.1. Fertilisation organo-minérale

La fertilisation organo-minérale consiste à apporter à la fois des fertilisants organiques et minéraux au sol, en vue d'améliorer sa productivité (Sedogo., 1981). Elle permet d'une part, d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et les rendements, grâce aux effets complémentaires de la matière organique et des engrais minéraux (Somda et al., 2017). La combinaison des deux types de fertilisants impacte positivement les paramètres de qualité du sol tels que l'azote total et le carbone, et augmente l'efficacité d'utilisation des engrais minéraux (Bonzi et al., 2008; Ouandaogo et al., 2016). La présence du support organique permet aussi de réduire l'effet acidifiant des engrais minéraux, en maintenant un pH du sol à un niveau propice à vie des microorganismes (Miranda et al., 2014). En outre, l'adjonction des amendements organiques aux engrais minéraux permet de réduire les pertes de nutriments par l'augmentation de la capacité d'échange cationique, ce qui favorise une meilleure rétention des nutriments libérés par les engrais minéraux (Dugué et al., 2015). La fertilisation organo-minérale est, de ce fait, une pratique de gestion durable de la fertilité des sols. Les travaux de Ibrahim et al. (2015) et Somda et al. (2017) ont montré que la combinaison du fumier ou compost, même en de faibles doses d'engrais par microdose, permettait d'améliorer substantiellement les rendements du sorgho et de mil par rapport à la microdose de NPK pur. Cet impact est encore plus élevé lorsque les apports localisés d'engrais sont associés aux techniques de gestion d'eau à la parcelle comme le *zai*, les billons cloisonnés (Bagayoko et al., 2011; Barro et al., 2018).

1.7.2. Technique de Microdose

Les techniques d'apport localisé à proximité des racines, le long de la ligne de semis, ou à proximité de la raie de semis, font partie des pratiques simples qui améliorent l'absorption des nutriments par les plantes et limitent le risque de pertes. La localisation des engrais permet donc d'améliorer le coefficient d'utilisation des nutriments apportés par les engrais, et de diminuer la quantité d'engrais immobilisé sous forme organique par la biomasse microbienne du sol. La microdose est l'une des formes rependues dans la bande sahélienne. C'est une technique d'apport localisé d'engrais minéraux consistant à appliquer de petites quantités d'engrais dans les poquets de semis (Tabo et al., 2011). Cette technologie comprend deux variantes ; l'application de petites quantités d'engrais minéraux associée aux semences de la culture cible dans les poquets au moment du semis, ou l'application d'engrais quelques semaines après le semis (Figure 5) (Hayashi et al., 2008; ; ICRISAT, 2008).

Le microdosage d'engrais a été développé à l'origine par l'Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT), pour réduire considérablement la quantité d'engrais à appliquer par l'amélioration de leur efficacité. Son efficacité sur les rendements des cultures a été prouvée à de nombreuses reprises, dans les systèmes de culture à faibles intrants (Sime & Aune, 2014; Ibrahim et al., 2016). Les augmentations de rendements enregistrées dans la sous-région vont souvent du simple au double voire au triple (Saba et al., 2017). Malgré les effets positifs de la microdose son adoption a été limitée par sa forte

demande en main-d'œuvre, sa faible mécanisation et la grande variabilité spatio-temporelle de ses réponses (Bielders & Gérard, 2015; Ouedraogo et al., 2020; Sanogo, 2022). En outre, c'est avéré que l'application de cette technique, sans apport de matière organique ou combinée à d'autres pratiques agronomiques de conservation de l'eau et du sol, entraîne des bilans nutritifs négatifs du sol plus importants qu'en absence d'engrais, et accélère l'épuisement des sols déjà appauvris (Tovihoudji & Akponikpe, 2015; Tovihoudji et al., 2017). Au regard de ce qui précède, cette technique prometteuse mériterait d'être associée à d'autres pratiques agronomiques durables, pour produire plus d'impact.



Figure 5: Application de NPK par microdose sur le maïs (Cliché F. Saba, 2019)

1.7.3. Utilisation des engrais à libération lente

Pendant que les rendements diminuent, la croissance démographique continue, exacerbant le risque d'insécurité alimentaire. Les agriculteurs du Sahel font face à de nombreuses contraintes agricoles.

La fertilisation minérale est une composante fondamentale de la production agricole dans les sols pauvres. Pourtant, les taux d'utilisation de fertilisants restent très faibles, à cause des coûts élevés pour respecter les doses recommandées d'engrais minéraux et le risque d'investissement que cela implique dans le contexte de changement

climatique. A cela, s'ajoute l'inefficacité des pratiques conventionnelles de fertilisation et leur impact négatif des pertes excessives sur l'environnement : ceci impose de tester de nouvelles pratiques de fertilisation. C'est dans cette perspective que des engrais à libération lente à base d'engrais minéraux ont été introduits dans les systèmes de production, comme solutions innovantes par la recherche pour améliorer l'efficacité des engrais synthétiques, leurs modes d'application, et pour réduire les répercussions négatives des apports abusifs sur l'environnement. Cette technologie prometteuse en matière de pratique de fumure minérale, comprend trois principaux types de formulations, à savoir les engrais à libération contrôlée (CRF), les engrais à libération lente ou "*Slow Release Fertilizer*" (SRF), et les inhibiteurs de nitrification. Les engrais à libération progressive ou « engrais à efficacité améliorée », sont des engrais auxquels un certain nombre de mécanismes (revêtements semi-perméables, matériaux protéiques, produits chimiques, etc.) sont appliqués dans le but de retenir les éléments minéraux plus longtemps, et retarder leur disponibilité aux plantes lors de son application (Trenkel, 2010). Ces engrais sont généralement sous forme de petites sphères dégradables, poreuses, qui diffusent progressivement les nutriments qu'elles contiennent en contact de l'humidité. Le contrôle du relargage des nutriments est donc lié à plusieurs mécanismes contrôlant la solubilisation du matériau par l'utilisation de revêtements semi-perméables, de matières protéiques ou d'autres formes chimiques, ou de l'hydrolyse lente de matières hydrosolubles, ou encore par d'autres mécanismes non encore élucidés. Ce contrôle a un effet positif sur l'absorption des nutriments par les plantes, et donc sur l'amélioration des rendements et de la teneur en matière organique du sol à long terme. Selon le Comité Européen de Normalisation (CEN), un engrais SRF doit avoir un taux de libération des éléments nutritifs beaucoup plus lent que celui des engrais conventionnels ; de ce fait, moins de 15% des nutriments contenus dans l'engrais-SRF doivent-être libérés dans les premières 24 heures après son application, et 75% du contenu libéré après 28 jours d'application (Trenkel, 2010).

Les engrais à libération contrôlée sont des nanoparticules ou engrais solubles avec un revêtement constitué de matériau organique ou inorganique issus de la nanoencapsulation des engrais conventionnels, dont le taux et la durée de la libération des nutriments sont connus et contrôlables pendant sa préparation (González et al., 2015). Les engrais nano-encapsulés permettent une libération lente et durable des nutriments et des produits agrochimiques, ce qui se traduit par un dosage précis pour les plantes. Cela permet de répondre aux exigences spécifiques de certaines cultures dans l'agriculture de précision, avec des avantages en termes d'économie en quantité d'engrais et de travail. Du fait de leur enrobage de nanomatériaux, l'utilisation des CRF peuvent résoudre les problèmes de pollution liés aux engrais conventionnels à travers une maîtrise des quantités de nutriments libérées en raison de la tension superficielle plus élevée des nanoparticules que des surfaces conventionnelles. Les applications des engrais CRF ont donné des résultats positifs (Duhan et al., 2017), mais sa promotion pourrait être limitée par l'exigence de main d'œuvre hautement qualifiée et un retour sur investissement négatif au regard du coût de revient des produits dans la sous-région. Pour les engrais azotés sensibles à la lixiviation et volatilisation, l'enrobage d'engrais par des polymères (Figure 6) ou l'ajout de stabilisateur d'azote, permet de prolonger leur durée de séjour dans le sol sous forme

d'urée-N ou N-ammoniacale (Rashidzadeh et al., 2015). Parmi ces stabilisateurs d'azote, figurent les inhibiteurs de nitrification qui bloquent le processus d'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en nitrates. Ils permettent ainsi de réduire les pertes azotées, en particulier dans les zones où les sols sont sableux, et par conséquent améliorent les rendements. Par exemple, (Cheng et al., 2022) ont obtenu une augmentation des rendements du riz et du colza de 6,1 à 15,5%, respectivement et la teneur en matière organique de 11,4 % suite à l'application de l'urée enrobé (33% N) d'un revêtement mixte de soufre et d'un polymère mince, comparativement à l'urée conventionnelle (46% N). La vulgarisation de ce type de fertilisants est confrontée à trois contraintes majeures : ils sont coûteux, leur préparation exige un certain niveau de technicité, et ils posent des problèmes environnementaux, puisque certains matériaux d'enrobage sont non biodégradables. De même, la cinétique de la libération des éléments minéraux par ces engrais est non prévisible sur le terrain, car ceux-ci sont vulnérables aux variations de la température et d'humidité du sol. Des changements dans l'une de ces conditions rendront le taux de libération des engrais imprévisible, et auront une incidence négative sur l'efficacité d'utilisation des éléments surtout si le taux de libération a été calibré pour une culture spécifique.

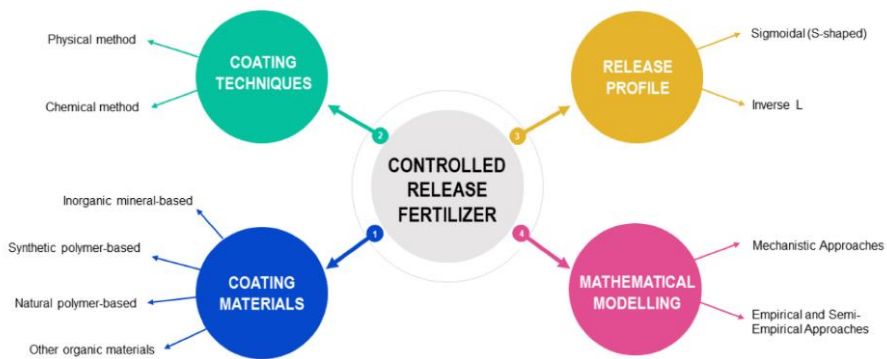


Figure 6 : Résumé graphique du mécanisme de mise en place d'engrais enrobé (Lawrencia et al., 2021)

1.8. Gestion de la fertilité des sols par l'utilisation du biochar

Le biochar est un amendement du sol obtenu par pyrolyse de biomasses en absence ou sous limitation d'oxygène (Cornelissen et al., 2016). Les propriétés du biochar et ses effets dans les écosystèmes agricoles dépendent largement de la biomasse utilisée et des conditions de pyrolyse. Le biochar (Figure 7) est constitué de plus de 70% de carbone stable, formé par des groupes aromatiques condensés. De ce fait, le biochar est considéré comme un substrat organique pouvant contribuer au stockage de carbone dans le sols, tout en pouvant proposer une approche de recyclage des résidus qui permet d'améliorer la circularité des nutriments et de produire de l'énergie (Figure 8) (Lehmann & Joseph, 1995; Lehmann, 2007). Son application au sol déclenche des interactions diverses liées aux groupes fonctionnels de surface, conduisant à la

modification des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols, favorables à une rétention des nutriments et de l'eau (Wang et al., 2017). Cela s'accompagne d'une répercussion positive sur les rendements des cultures (Liang et al., 2014; Speratti et al., 2017). Les résultats issus d'analyse de métadonnées ont révélé des rendements des cultures de l'ordre de 10% à 42%, suite à l'apport de biochar (Jeffery et al., 2011; Joseph et al., 2021). Ces augmentations sont cependant uniquement significatives dans les sols acides et à faible teneur nutritive, et dans les sols sableux des zones sèches, en raison de l'augmentation de la rétention des nutriments et de la capacité de rétention d'eau (Gwenzi et al., 2018; Pandit et al., 2018). Toutefois, il faut noter que les rendements supplémentaires engrangés à court terme sous apport de biochar, ont été obtenus dans la majorité des cas avec des doses élevées, généralement au-delà de 10 t.ha⁻¹ (Hagemann, et al., 2017). Des tendances similaires ont été enregistrées sur des sols dégradés du Burkina Faso, avec des apports de 10 à 30 t de biochar par hectare (Burgeon, 2017). Selon ces auteurs, la promotion de grandes doses de biochar ne sont pas économiquement viables à l'échelle du petit producteur, qui risque d'être confronté aux difficultés de mobilisation de quantités suffisantes de biomasse. Pour Clare et al. (2015), l'adoption des doses élevées risque de ne pas produire un retour positif sur l'investissement, surtout en production céréalière. Certains auteurs émettent des réserves sur son effet positif sur l'évolution de l'activité microbienne, car trop concentré en carbone aux propriétés biochimiques récalcitrantes, avec un peu de disponible comme source d'énergie. D'autres même ont observé des effets dépressifs sur les plantes, et une baisse de rendements avec les apports de grandes doses (Prapagdee & Tawinteung, 2017), faisant penser à une possible toxicité des fortes concentrations de biochar pour certaines cultures.



Figure 7: Biochar de tiges de cotonnier (Cliché F. Saba, 2020)

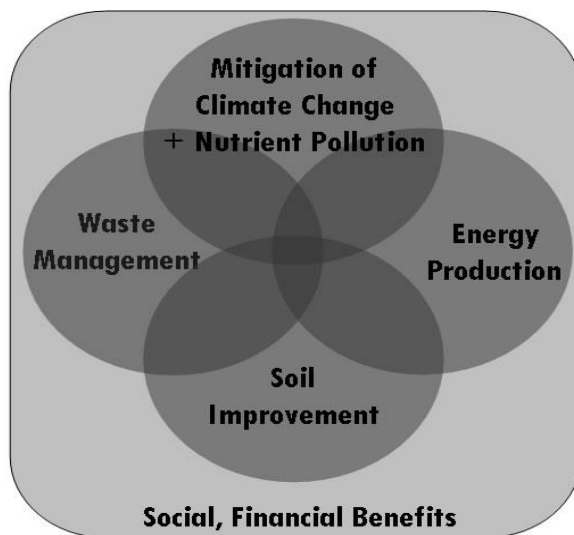


Figure 8: Composantes du système de biochar (Lehmann et Joseph, 2009)

Au regard des nombreux bénéfices liés à l'apport du biochar malgré son faible apport en nutriments et aux éventuelles difficultés que pourrait engendrer la mobilisation de doses élevées par les petits producteurs, certains auteurs (Hagemann et al., 2017 ; Schmidt et al., 2014, 2017, Gwenzi et al., 2018) ont proposé de l'activer et le charger en nutriments afin d'accroître son efficacité à faible dose et pour que celui-ci ait des effets positifs dès son application. Cette possibilité réside dans le fait que certaines propriétés du biochar, notamment sa grande surface spécifique et sa structure poreuse (Figure 9), permettent au biochar d'adsorber et relarguer progressivement des solutés anioniques et cationiques tels que les nitrates et l'ammonium (Clough et al., 2013), et les phosphates (Yao et al., 2011), et susceptibles de modifier leur cycle une fois appliqué au sol (Harter et al., 2013; Wen et al., 2017). Ces propriétés font du biochar un support potentiel pour produire et vulgariser des fertilisants à libération lente ou biochar-SRF, à moindre coût au profit des ménages à faible revenu. Ce mécanisme permet de limiter les pertes par lixiviation des nitrates, et d'accroître leur efficacité et le rendement de l'ordre de 20% (Schmidt et al., 2017 ; Alshamaileh et al., 2018 ; Gwenzi et al., 2018). La promotion des engrais-SRF à base de biochar de biomasses disponibles, ouvre des perspectives de gestion durable de la fertilité des sols dégradés du Burkina Faso.

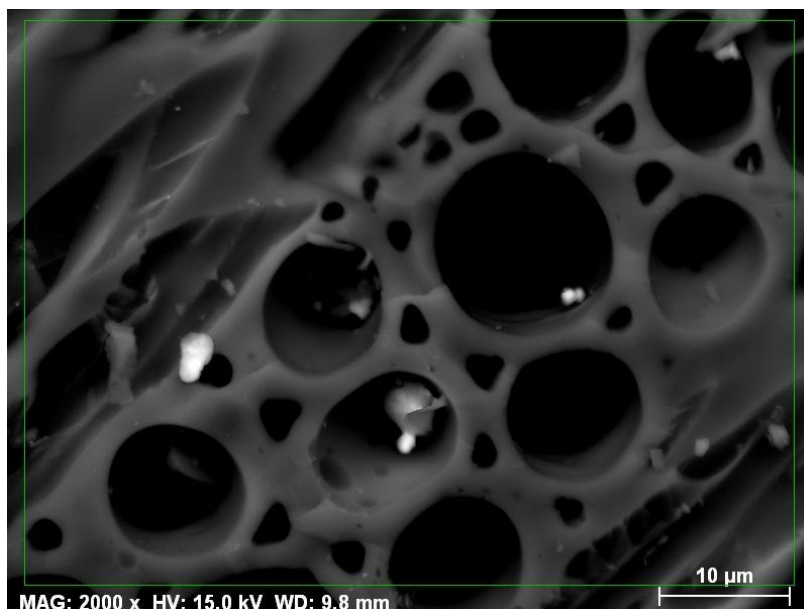


Figure 9 : Vue de la structure poreuse du biochar par l'analyse SEM (F. Saba, 2018)

1.8.1. Techniques de production de fertilisants à libération lente à base de biochar

Les effets de l'utilisation du biochar pristine comme amendements du sol ont été largement documentés (Liang et al., 2014). Le biochar pristine est une substance poreuse et riche en carbone, provenant directement de la pyrolyse sans aucune modification de ses propriétés physico-chimiques ou biologiques, et utilisé pour amender les sols ou pour l'élimination des polluants (Amusat et al., 2022). Malgré ses nombreux avantages, le biochar issu de la pyrolyse est généralement trop pauvre en nutriments, et par conséquent libère peu de nutriments lorsqu'il est directement incorporé au sol (Ding et al., 2016). Un certain nombre de travaux ont donc mis l'accent sur son traitement avec divers procédés ou modifications, pour produire du biochar enrichi en nutriments ou biochar-SRF, efficace même à faible dose dans le sol (Schmidt et al., 2017; Wang et al., 2022). Ces techniques de modification du biochar sont appelées « activation ou enrichissement ». Il existe plusieurs techniques d'activation du biochar, dont le but est de créer certaines propriétés pour des usages spécifiques (Figure 10).

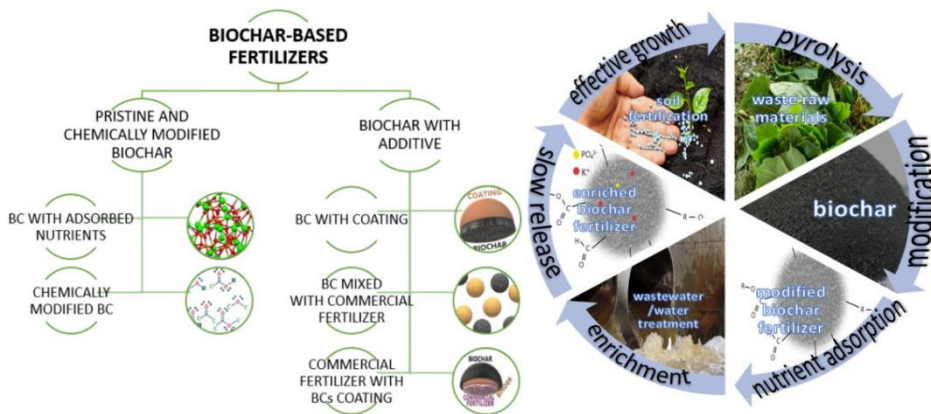


Figure 10: Types de production de fertilisants à base de biochar (Rombel et al., 2022)

Activation par adsorption ou technique d'enrichissement du biochar par imprégnation/macération : elle peut se faire de deux manières ; soit en adsorbant les nutriments d'une solution nutritive (engrais minéraux, urine) spécialement préparée pour la circonstance (Schmidt et al., 2017; Lateef et al., 2019), ou en utilisant le biochar pour adsorber les nutriments (nitrates et phosphates notamment) contenus dans les eaux usées (Dai et al., 2020). Ce procédé de traitement des eaux est une solution palliative contre l'eutrophisation des cours d'eau. Des résultats concluants ont été engagés avec le biochar-SRF produit par imprégnation en matière de taux de fourniture en nutriments pour les cultures et d'augmentation de rendement (Dietrich et al., 2020).

Activation par des modifications chimiques : cette technique permet de changer la composition chimique du biochar, pour accroître les propriétés absorbantes et structurales indispensable pour modifier la cinétique globale de relargage des nutriments (Rombel et al., 2022). Il s'agit généralement de pré-traitement de la biomasse qui se déroule avant la pyrolyse, et se fait principalement avec des substances acides (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4), basiques (KOH et NaOH), ou avec des substances comme FeCl_3 , $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, MgCl_2 , NH_4Cl , ZnCl_2 (Saleh & Hedia, 2018). Le prétraitement agit directement sur le taux d'adsorption des nutriments grâce à l'augmentation de la surface spécifique, ou le développement d'une affinité pour l'adsorption de certains éléments comme les phosphates (Fang et al., 2020). Néanmoins, il convient de souligner que l'efficacité de la modification chimique dépend du type de biomasse et des caractéristiques de pyrolyse, qui conditionne la réussite de la modification et peut souvent aboutir à une faible adsorption des nutriments ou cibler les nutriments inappropriés (Al-Rawajfeh et al., 2019; Panwar & Pawar, 2020). En plus des prétraitements chimiques, l'élévation progressive de la température au cours de la pyrolyse est l'une des techniques permettant de réduire la taille de pores, et cela a pour répercussion la diminution de la vitesse de libération (Ma et al., 2016).

Activation par enrobage de biochar : L'enrobage du biochar est une méthode utilisée pour réguler la cinétique de libération des nutriments, et améliorer l'efficacité de leur utilisation par les plantes. Ce procédé consiste à encapsuler physiquement les granules d'engrais à base de biochar dans des matériaux hydrophobes organiques ou inorganiques, qui agissent comme une barrière de diffusion des éléments nutritifs (Hagemann et al., 2017; Lawrencía et al., 2021). Parmi les matériaux de revêtement, on trouve divers matériaux polymères et non polymères qui peuvent être biodégradables ou non. Pour des questions de durabilité, il est recommandé d'opter pour des revêtements biodégradables et accessibles localement tels que la bentonite, l'amidon etc., ou des combinaisons d'huiles minérales (Naz & Sulaiman, 2016).

Activation par adjonction du biochar aux engrais de synthèse : c'est la forme la plus simple et la plus pratiquée. Elle consiste à mélanger le biochar avec des engrais commerciaux ou en recouvrant les engrais d'une couche de biochar, ou en l'associant durant le compostage (Angsh & Sohi, 2013; Cissé et al., 2021).

1.8.2 Quelques effets bénéfiques de l'apport du biochar-SRF au sol

L'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments est l'un des défis majeurs dans les agroécosystèmes tropicaux, particulièrement chez les petits producteurs. Au Burkina Faso, l'exportation des résidus des cultures et la pratique de fertilisation sub-optimale sont les principales causes du déclin de la fertilité des sols (Koulibaly et al., 2010; Pouya et al., 2013). Parmi les techniques proposées pour améliorer l'efficacité des engrais minéraux, l'emploi des fertilisants à libération lente à base de biochar ou biochar-SRF constitue une innovation accessible aux petits producteurs pour accroître les rendements agricoles et les propriétés des sols (Saba et al., 2022). De nombreux auteurs (Liu et al., 2019; Puga et al., 2020) associent la performance du biochar-SRF à sa capacité à améliorer la disponibilité des nutriments pour l'absorption par les plantes après leur application. Comparativement aux engrais conventionnels, les engrais-SRF ont un faible taux de libération des nutriments, ce qui prolonge leur disponibilité pour les plantes sur une période relativement longue, et diminue les pertes de nutriments dans l'environnement. Ces caractéristiques exceptionnelles du biochar-SRF sont attribuables à sa grande surface spécifique, à l'abondance de micropores et des groupes fonctionnels de surface. Ainsi, des études antérieures (Spokas et al., 2012; Wang et al., 2017; Lateef et al., 2019) ont prouvé que l'application du biochar-SRF améliore la capacité de rétention d'eau, la teneur en matière organique de 232 à 514% et des micronutriments de 110 à 230% des sols amendés. Il a aussi été rapporté des accroissements significatifs de la teneur en azote et en phosphore du sol, suite à l'application du biochar enrichi avec de l'urée ou KH_2PO_4 (Chen et al., 2018; Ngatia et al., 2019). L'amélioration des propriétés physico-chimiques est généralement accompagnée d'une augmentation significative des rendements des cultures, allant de 10-38% (Manzoor et al., 2022; Shi et al., 2022). En effet, Zheng et al. (2017) ont obtenu une augmentation du rendement du maïs de plus de 10% suite à l'apport du biochar enrichi au di-ammonium phosphates (DAP) ou au chlorure de potassium (KCl), par rapport à l'application du NPK (15-15-15). Cette performance est attribuée à l'amélioration des propriétés chimiques du sol, notamment la teneur en N, P et C organique de 7, 7 et 57% respectivement. De même, Shi et al. (2022) ont obtenu des augmentations du rendement du blé de 13 à 38%, et

de la teneur en azote des grains de 19 à 55% par rapport à l'utilisation de l'urée pure. Ces effets positifs susmentionnés font du biochar-SRF un fertilisant susceptible d'améliorer l'efficacité des nutriments dans les sols pauvres et poreux du Burkina Faso.

Dans la présente étude, le terme "biochar pristine" fait référence aux biochars non activés issus directement de la pyrolyse des tiges de cotonnier et "biochar-SRF" leurs dérivés formés à partir de biochars par activation avec une solution nutritive chimique, enrobé ou non avec de la gomme arabique.

1.9. Conclusion partielle

La dégradation des sols constitue véritablement un frein à l'efficacité des systèmes de production du Burkina Faso. Causée principalement par une exploitation inappropriée de l'homme, la dégradation des sols se traduit le plus souvent par l'érosion des sols, l'encroustement des surfaces cultivables et la baisse de la fertilité des sols. Plusieurs initiatives ont été vulgarisées pour améliorer la fertilité des sols et les rendements agricoles, parmi lesquelles nous pouvons citer l'utilisation des engrais minéraux. Cependant, leur adoption par les petits producteurs, même celles comme la technique d'application de la microdose, a été limitée par leurs coûts exorbitants conduisant au rationnement des engrais et donc à une accentuation de la baisse de la fertilité des sols. Au regard du rôle important des engrais minéraux à améliorer les productions agricoles sur les sols pauvres en nutriments, le défi actuel est d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments par les plantes. Ce défi peut être relevé à travers le recyclage sous forme de biochar des quantités énormes de biomasses agricoles générées annuellement et peu ou pas utilisées, pour servir de support pour la production des fertilisants à libération lente afin d'amender les sols pauvres à forts potentiels de pertes de nutriments. C'est dans cette perspective que s'inscrivent nos travaux.

1.10. Références bibliographiques

- Al-Rawajfeh, A. E., AlShamaileh, E. M., & Alrbaihat, M. R. (2019). Clean and efficient synthesis using mechanochemistry: Preparation of kaolinite–KH₂PO₄ and kaolinite–(NH₄)₂HPO₄ complexes as slow released fertilizer. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 73, 336–343. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.01.046>
- Amusat, S.O., Kebede, T. G., Nxumalo, E. N., Dube, S., & Nindi, M. . (2022). Incorporating pristine biochar into metal-organic frameworks: Facile green synthesis, characterization, and wastewater remediation. *Bioresource Technology Reports*, 19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101160>
- Angsh, E. T., & Sohi, P. S. (2013). Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy*, 5, 221–226. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12023>
- 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>
- Bado, B. V., Sédogo, M. P., Cescas, M. P., Lompo, F., & Bationo, A. (1997). Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 6(571–575).
- Bagayoko, M., Maman, N., Palé, S., Sirifi, S., Taonda, S. J. B., Traore, S., & Mason, S. C. (2011). Microdose and N and P fertilizer application rates for pearl millet in West Africa. Available online at <http://www.academicjournals.org/AJAR>. *African Journal of Agricultural Research*, 6(5), 1141–1150. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.711>
- Bandaogo, A., Bidjokazo, F., Youl, S., Safo, E., Abaidoo, R., & Andrews, O. (2015). Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102(1), 79–89. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9653-6>
- Barbier, E. B. (2009). “Ecosystems as Natural Assets”, Foundations and Trends. *Microeconomics*, 4(8), 611–681. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1561/07000000031>
- Barro, A., Sankara, S., & Pulchérie, C. (2018). Effect of zaï and micro dose on root biomass and the grain and straw yield of sorghum at Tangaye in the North region in Burkina Faso. *International Journal of Environment Agriculture and Biotechnology*, 3(5), 1913–1921. <https://doi.org/10.22161/ijeab/3.5.44>
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., & Kimetu, J. (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 94(1), 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2005.08.011>
- Beaudet, G. (1992). Dynamique et dégradation des milieux physiques de l'Ouest africain. In *Annales de géographie (Paris)* (Vol. 101, Issue 564, pp. 214–219).
- Belemvire, A., Maiga, A., Sawadogo, H., Savadogo, M., & Ouedraogo, S. (2008). Evaluation des impacts biophysiques et socioéconomiques des investissements dans les actions de gestion des ressources naturelles au nord du plateau central du Burkina Faso. Rapport CILSS, 94.
- Benlamlih, Z. F. (2019). Évaluation d'une nouvelle génération d'engrais enrobés pour diminuer le lessivage des éléments minéraux et réduire les émissions de gaz à effet de serre (N₂O). Mémoire maîtrise en sols et environnement Université de Laval. 82p
- Bielders, C. L., & Gérard, B. (2015). Field Crops Research Millet response to microdose fertilization in south – western Niger : Effect of antecedent fertility management and environmental factors. *Field Crops Research*, 171, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.008>
- Bikienga, I. M. (2002). Une évaluation des secteurs des engrais et des semences au Burkina Faso. In *Africa Yearbook* (Vol. 9).
- Blanchard, M., Vall, É., Tinguéri, 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>
- Blondiau, L. (2018). *Nutrient recycling using biochar on plinthosol of Burkina Faso: a soil-plant column experiment*. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/5088>
- 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>
- Bonzi, M., Lompo, F., Kiba, D. I., & Sédogo, P.M. (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. pp 83-98 in Bationo, A., Tabo, R., Waswa, B., Okeyo, J., Kihara, J., Fosu, M. and Kaboré, S. (eds.). 2008: Synthesis of soil, water and nutrient management research in the Volta Basin. Nairobi, Kenya: Ecomedia Ltd.
- 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
- Chen, S., Yang, M., Ba, C., Yu, S., Jiang, Y., Zou, H., & Zhang, Y. (2018). Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers. *Science of the Total Environment*, 615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.209>
- Cheng, B. H., Zeng, R. J., & Jiang, H. (2017). Recent developments of post-modification of biochar for electrochemical energy storage. *Bioresource Technology*, 246, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.060>
- Cheng, S., Xing, Z., Tian, C., Li, S., Tian, J., Liu, Q., Hu, Y., Guo, B., Hu, Q., Wei, H., Gao, H., & Zhang, H. (2022). Effects of Controlled Release Urea Formula and Conventional Urea Ratio on Grain Yield and Nitrogen Use Efficiency of Direct-Seeded Rice. *Agriculture (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture12081230>
- Cissé, D., Cornelis, J. T., Traoré, M., Saba, F., Coulibaly, K., Lefebvre, D., Colinet, G., & Nacro, H. B. (2021). Co-composted biochar to decrease fertilization rates in cotton–maize rotation in Burkina Faso. *Agronomy Journal*, 113(6), 5516–5526. <https://doi.org/10.1002/agj2.20867>
- Clare, A., Shackley, S., Joseph, S., Hammond, J., Pan, G., & Bloom, A. (2015). Competing uses for China's straw: The economic and carbon abatement potential of biochar. *GCB Bioenergy*, 7(6), 1272–1282. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12220>
- 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>
- CSAO. (2005). Développement local et décentralisation : Eléments d'analyse et de

- réflexion à partir de certains travaux du CSAO. <https://www.oecd.org/fr/csao/>
- Da, C. É. D. (2008). Impact des techniques de conservation des eaux et des sols sur le rendement du sorgho au centre-nord du Burkina Faso. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 61(241–242), 99–110. <https://doi.org/10.4000/com.3512>
- Dai, Y., Wang, W., Lu, L., Yan, L., & Yu, D. (2020). Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus. *Journal of Cleaner Production*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120573>
- Diabagate, A. (2006). *Déterminants de la qualité agronomique de la fumure organique utilisée dans la zone soudano-sahélienne: cas du terroir de Ziga dans la province de Yatenga au Burkina Faso* (Vol. 0). Université Abdou Moumouni.
- Dietrich, C. C., Rahaman, A., Robles-aguilar, A. A., Latif, S., Intani, K., Müller, J., & Jablonowski, N. D. (n.d.). *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>
- Dugué, P., Djamen, N P., Faure, G., Le Gal P-Y. (2015). Dynamiques d'adoption de l'agriculture de conservation dans les exploitations familiales : de la technique aux processus d'innovation. *Cahiers Agriculture*, vol. 24, n° 2, Mars-Avril 2015, p. 60–68. <https://doi.org/10.1684/arg.2015.0748>
- Fairhurst, T. (2015) Manuel de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols. Consortium Africain pour la Santé des Sols, Nairobi. 179p.
- Fang, L., Li, J. shan, Donatello, S., Cheeseman, C. R., Poon, C. S., & Tsang, D. C. W. (2020). Use of Mg/Ca modified biochars to take up phosphorus from acid-extract of incinerated sewage sludge ash (ISSA) for fertilizer application. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118853>
- FIDA. (2019). Burkina Faso: Évaluation de la stratégie et du programme de pays. *Réforme, Humanisme, Renaissance*, 15(2), 151.
- González, M. E., Cea, M., Medina, J., González, A., Diez, M. C., Cartes, P., Monreal, C., & Navia, R. (2015). Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material. *Science of the Total Environment*, 505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.014>
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., & Mukome, F. N. D. (2017). Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 197). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.087>
- 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>
- Harter, J., Krause, H., Schuettler, S., Ruser, R., Fromme, M., Scholten, T., Kappler, A., & Behrens, S. (2013). Linking N₂O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community. *The ISME Journal*, 1–15. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.160>
- Hayashi, K., Abdoulaye, T., Gerard, B., & Bationo, A. (2008). Evaluation of application timing in fertilizer micro-dosing technology on millet production in Niger, West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 80(3), 257–265. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9141-3>
- Houot, S. (2020). Retour au sol des produits résiduels organiques. Des essais au champ de longue durée : intérêt d'un réseau. Journée technique, Ademe/INRA, Nov 2007, Colmar, France. 180 p.2007. hal-01191957
- Ibrahim, A., Abaidoo, R. C., Fatondji, D., & Opoku, A. (2015a). 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>
- Ibrahim, A., Abaidoo, R. C., Fatondji, D., & Opoku, A. (2015b). Integrated use of fertilizer micro-dosing and *Acacia tumida* mulching increases millet yield and water use efficiency in Sahelian semi-arid environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 103(3), 375–388. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9752-z>
- Ibrahim, A., Abaidoo, R. C., Fatondji, D., & Opoku, A. (2016). Determinants of fertilizer microdosing-induced yield increment of pearl millet on an acid sandy soil. *Experimental Agriculture*, 52(4), 562–578. <https://doi.org/10.1017/S0014479715000241>
- ICRISAT. (2008). ICRISAT Archival Report 2008. Documentation. International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, Andhra Pradesh, India.
- INSD, (2022). Annuaire statistique 2021. 374p
- 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," 144(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Kabore, P. N., Ouedraogo, A., Sanon, M., Yaka, P., & Some, L. (2017). Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du Centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. *Climatologie*, 14, 82–95.

- Koulibaly, B., Dakuo, D., Ouattara, A., Traoré, O., Lompo, F., N. Zombré, P., & Yao-Kouamé, 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. *Tropicicultura*, 33(2), 125–134.
- Koulibaly, B., Traoré, O., Dakuo, D., Zombré, P., & Bondé, D. (2010). Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicicultura*, 28(3), 184–189.
- Lateef, A., Nazir, R., Nadia, J., Alam, S., Shah, R., Naeem-Khan, M., Saleem, M., & Rehman, S.-. (2019). Synthesis and characterization of environmental friendly corncob biochar based nano-composite – A potential slow release nano-fertilizer for sustainable agriculture. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100212>
- Lawrencia, D., Wong, S. K., Low, D. Y. S., Goh, B. H., Goh, J. K., Ruktanonchai, U. R., Soottitantawat, A., Lee, L. H., & Tang, S. Y. (2021). Controlled release fertilizers: A review on coating materials and mechanism of release. *Plants*, 10(2), 1–26. <https://doi.org/10.3390/plants10020238>
- Lehmann, Johannes Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd ed. Lehmann, Johannes, Joseph, Stephen (Eds.), Earthscan, London and Sterling, VA, pp. 1-12.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Ecol Environ*, 5(7), 381–387.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (1995). *Biochar for Environmental Management : An Introduction. 1*, 1–12.
- Liang, F., Li, G., Lin, Q., & Zhao, X. (2014). Crop yield and soil properties in the first 3 years after biochar application to a calcareous soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3), 525–532. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60708-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60708-X)
- 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>
- Lompo, F., Bonzi, M., Bado, B. V., Gnankambary, Z., Ouandaogo, N., Sedogo, M. P., & Assa, A. (2008). Organo-Minerales Sur La Dynamique Du Phosphore. *Agronomie Africaine*, 20(2), 165–178.
- Ma, X., Zhou, B., Budai, A., Jeng, A., Hao, X., Wei, D., Zhang, Y., & Rasse, D. (2016). Study of Biochar Properties by Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(5), 593–601. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1146742>
- MAAH. (2018). Situation de référence des terres dégradées et de la CES au Burkina Faso : rapport final. 394p
- MAAH, 2019. Stratégie nationale de Restauration, Conservation et Récupération des sols au Burkina Faso 2020-2024. Ouagadougou, Burkina Faso, 59 p
- MAAHA. (2021). *Tableau de bord statistique de l'agriculture 2020*. 86p.
- Manzoor, S., Habib-ur-Rahman, M., Haider, G., Ghafoor, I., Ahmad, S., Afzal, M.,

- Nawaz, F., Iqbal, R., Yasin, M., Tanveer-ul-Haq, Danish, S., & Ghaffar, A. (2022). Biochar and slow-releasing nitrogen fertilizers improved growth, nitrogen use, yield, and fiber quality of cotton under arid climatic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(9), 13742–13755. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16576-6>
- Mensah, E., Almas, L., Guerrero, B.L., Lust, D., & Ibrahimov, M. (2016). Agriculture and the State of Food Insecurity in Western Africa. *Umn*. <https://ageconsearch.umn.edu/record/229976/files/saea16lkaR.pdf>
- Millogo, D. (2002). Diagnostic des modes de gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de culture motorisés en zone cotonnière ouest du Burkina Faso. In *Culture*. UPB.
- Millogo, D., Nikiema, A., Koulibaly, B., & Zombre, N. P. (2017). Analyse de l'évolution de l'occupation des terres à partir de photographies aériennes de la localité de Loaga dans la province du Bam, Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5), 2133. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.16>
- Miranda, A.R.L., Nunes, L.A.P.L., Oliveira M.L.J., Melo W.J., Araujo A.S.F. (2014). Growth and nodulation of cowpea after 5 years of consecutive composted tannery sludge amendment. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12 (4) : 1175-1179
- Mwinuka, L., Mutabazi, K. D., Sieber, S., Makindara, J., & Bizimana, J. C. (2017). An economic risk analysis of fertiliser microdosing and rainwater harvesting in a semi-arid farming system in Tanzania. *Agrekon*, 56(3), 274–289. <https://doi.org/10.1080/03031853.2017.1343154>
- Naz, M. Y., & Sulaiman, S. A. (2016). Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: A review. *Journal of Controlled Release*, 225, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.01.037>
- Negash Demissie, N. D., & Israel Bekele, I. B. (2017). Optimizing fertilizer use within an integrated soil fertility management framework in Ethiopia. *Fertilizer Use Optimization in Sub-Saharan Africa*, December, 52–66. <https://doi.org/10.1079/9781786392046.0052>
- Ngatia, L. W., Grace III, J. M., Moriasi, D., Boolques, A., Osei, G. K., & Taylor, R. W. (2019). Biochar Phosphorus Sorption- Desorption: Potential Phosphorus Eutrophication Mitigation Strategy. *Intech, i(tourism)*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.014>
- Ouandaogo, N., Ouattara, B., Pouya, M. B., Gnankambary, Z., Nacro, H. B., & Sedogo, P. M. (2016). Effets des fumures organo-minérales et des rotations culturales sur la qualité des sols. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(2), 904. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i2.37>
- Ouedraogo, Y., Taonda, J. S., Idriss, S., Tychon, B., & Biolders, C. L. (2020). *Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-Saharan Africa: A meta-analysis*. July 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1002/agj2.20229>
- Pallo, FJ, & Thombiano, L. (1989). BUNASOLS - BP 7142 - Ouagadougou -

- BURKINA FASO. *SOLTROP* 89, 307–327.
- Pallo, FJP, Sawadogo, N., Sawadogo, L., Sedogo, M. P., & Assa, A. (2008). Statut de la matière organique des sols dans la zone sud-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 12(3), 29–38.
- 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>
- 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>
- Pouya, B. M., Savadogo, O. M., Ouedraogo, J., Vognan, G., Dakuo, D., Sedogo, P. M., & Lompo, F. (2020). Déterminants socio-économiques de la dégradation des sols et de l'adoption destechologies de gestion de la fertilité des sols selon les perceptions paysannes dans les zones cotonnières du Burkina Faso. *Asian Journal of Science and Technology*. 11 (6), pp.11003-11011
- Pouya, M. B., Bonzi, M., Gnankambary, Z., Traoré, K., Ouédraogo, J. S., Somé, A. N., & Sédogo, 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>
- Prapagdee, S., & Tawinteung, N. (2017). Effects of biochar on enhanced nutrient use efficiency of green bean, *Vigna radiata* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(10), 9460–9467. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8633-1>
- Puga, A. P., Castro, M., Queiroz, D. A., Antonio, M., Ligo, V., Carvalho, C. S., Marlene, A., Pires, M., Marcatto, D. O. S., Andrade, C. A. De, Ligo, V., Carvalho, C. S., Marlene, A., Pires, M., & Santos, J. D. O. (2020). Nitrogen availability and ammonia volatilization in biochar-based fertilizers. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(7), 992–1004. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1650916>
- Rashidzadeh, A., Olad, A., & Reyhanitabar, A. (2015). Hydrogel/clinoptilolite nanocomposite-coated fertilizer: swelling, water-retention and slow-release fertilizer properties. *Polymer Bulletin*, 72(10), 2667–2684. <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1428-y>
- Rombel, A., Krasucka, P., & Oleszczuk, P. (2022). Sustainable biochar-based soil fertilizers and amendments as a new trend in biochar research. *Science of the Total Environment*, 816, 151588. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151588>
- 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 systeme zai au centre-nord du Burkina Faso. *Agonomie Africaine*, 34(1), 1–14.
- Saba, F., Taonda, S. J. B., Serme, I., Bandaogo, A. A., Sourwema, A. P., & Kabre, A.

- (2017). Effets de la microdose sur la production du niébé, du mil et du sorgho en fonction la toposéquence Effects of fertilizer microdosing on cowpea, millet and sorghum production as a function of the toposequence. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11(5), 2082–2092. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.12>
- Sabo, I., Siri, A., & Zerbo, A. (2010). Analyse de l'impact des subventions de fertilisants chimiques de céréales au Burkina Faso : MEGC micro-simulé. 1–30. [http://www.undp.org/content/dam/burkina_faso/docs/publications/UNDP_bf_impact_subv_fert\(2\).pdf](http://www.undp.org/content/dam/burkina_faso/docs/publications/UNDP_bf_impact_subv_fert(2).pdf)
- Saleh, M. E., & Hedia, R. M. R. (2018). Mg-Modified Sugarcane Bagasse Biochar for Dual Removal of Ammonium and Phosphate Ions from Aqueous Solutions. *Alexandria Science Exchange Journal*, 39(1), 74–91. <https://doi.org/10.21608/asejaiqsae.2018.5753>
- Sanogo, M., Gaspard, F., Kabore, D., & Taonda, S. J. (2020). *The determinants of fertilizer microdosing adoption and impact on sorghum and maize yields in Burkina Faso*. 11(6), 114–122. <https://doi.org/10.7176/JESD/11-6-13>
- 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>
- Sawadogo, H., Bock, L., Lacroix, D., & Zombré, N. P. (2008). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 12(3), 3–9.
- Sawadogo, N., Zombre, N. P., & Sedogo, M. P. (2009). *Et Des Lixisols Sous Formations Naturelles De Longue Duree En Zone Nord-Soudanienne*. 21(3), 215–229.
- 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>
- Sedogo P.M. (1981). *Contribution à l'étude de la valorisation des résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride. Matière organique du sol, nutrition azotée des cultures (16) (PDF) Influence du mode de gestion de la fertilité des sols sur l'évolution*. INPL NANCY.
- Shi, W., Bian, R., Li, L., Lian, W., Liu, X., Zheng, J., Cheng, K., Zhang, X., Drosos, M., Joseph, S., & Pan, G. (2022). Assessing the impacts of biochar-blended urea on nitrogen use efficiency and soil retention in wheat production. *GCB Bioenergy*, 14(1), 65–83. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12904>
- Sime, G., & Aune, J. B. (2014). Maize response to fertilizer dosing at three sites in the central rift valley of ethiopia. *Agronomy*, 4(3), 436–451. <https://doi.org/10.3390/agronomy4030436>
- Somda, B. B., Ouattara, B., Serme, I., Pouya, M. B., Lompo, F., Taonda, S. J. B., & Sedogo, P. M. (2017). Détermination des doses optimales de fumures organo-

- minérales en microdose dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(2), 670. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i2.11>
- Speratti, A. B., Johnson, M. S., Sousa, H. M., Torres, G. N., & Couto, E. G. (2017). Impact of different agricultural waste biochars on maize biomass and soil water content in a Brazilian Cerrado Arenosol. *Agronomy*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy7030049>
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A., Lima, I. M., Lamb, M. C., Mcaloon, A. J., Lentz, R. D., & Nichols, K. A. (2012). *Biochar : A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration*. 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>
- Tabo, R., Bationo, A., Amadou, B., Marchal, D., Lompo, F., Gandah, M., Hassane, O., Diallo, M. K., Ndjunga, J., Fatondji, D., Gerard, B., Sogodogo, D., Taonda, J. S., Sako, K., Boubacar, S., Abdou, A., & Koala, S. (2011). Innovations as Key to the Green Revolution in Africa. *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa*. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2>
- Tovihoudji, G., & Akponikpe, P. (2015). Integrated fertiliser microdosing and organic manure to adapt to climate variability and change in Northern Benin. ... -*Smart Agriculture*, April, 2–3. <http://dial.uclouvain.be/handle/boreal:168492>
- Tovihoudji, P. G., Akponikpè, P. B. I., Agbossou, E. K., Bertin, P., & Bielders, C. L. (2017). Fertilizer microdosing enhances maize yields but may exacerbate nutrient mining in maize cropping systems in northern Benin. *Field Crops Research*, 213(March), 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.003>
- Traoré, A., Bocoum, I., & Tamini, L. D. (2020). Services financiers : quelles perspectives pour le déploiement d'innovations agricoles en Afrique ? *Économie Rurale*, 371, 77–94. <https://doi.org/10.4000/economierurale.7549>
- Traoré, M., Lompo, F., Thio, B., Ouattara, B., Ouattara, K., & Sedogo, M. (2012). Influence de la rotation culturale, de la fertilisation et du labour sur les populations de nématodes phytoparasites du sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 16(1), 59–66.
- Traore, S. A. A., & Requier-Desjardins, M. (2019). Etude sur l'économie de la dégradation des terres au Burkina Faso. *HAL Science Ouverte, version 1*, pp84. <https://doi.org/https://hal.science/hal-03046074>
- 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., Dugué, P., Blanchard, M. (2006). Le tissage des relations agriculture-élevage au fil du coton. *Cahiers Agricultures* vol. 15(1). 72-79. <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30562>
- Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A

- mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167>
- Wang, H., Zheng, H., Jiang, Z., Dai, Y., Liu, G., Chen, L., Luo, X., Liu, M., & Wang, Z. (2017). Efficacies of biochar and biochar-based amendment on vegetable yield and nitrogen utilization in four consecutive planting seasons. *Science of the Total Environment*, 593–594, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.096>
- 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>
- Wen, P., Wu, Z., Han, Y., Cravotto, G., Wang, J., & Ye, B. C. (2017). Microwave-Assisted Synthesis of a Novel Biochar-Based Slow-Release Nitrogen Fertilizer with Enhanced Water-Retention Capacity. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(8), 7374–7382. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01721>

Chapitre 2

Activation du biochar pour produire un *slow release fertilizer* (SRF) : une option de gestion efficiente des nutriments

Chapitre 2. Activation du biochar pour produire un fertilisant à libération lente (*slow release fertilizer-SRF*) : une option de gestion efficiente des nutriments

Résumé

La fertilisation minérale à base des engrais minéraux NPK et urée, est une pratique courante pour améliorer les rendements des cultures dans les exploitations agricoles du Burkina Faso. Pourtant, les rendements moyens obtenus sous fertilisation sont généralement faibles par rapport aux rendements potentiels des cultures, dus à la faible efficacité d'utilisation des nutriments par les plantes. Cette étude visait à produire et caractériser un fertilisant à libération lente à base de biochar de tiges de cotonnier et de solution de NPK (biochar-SRF), comme alternative à l'utilisation des engrais minéraux. Le biochar-SRF a été produit par macération du biochar pristine dans des solutions de NPK aux concentrations correspondant aux doses de 100 kg/ha (Biochar-SRF100), 125 kg/ha (Biochar-SRF125), et 150 kg/ha (Biochar-SRF150). Ces trois fertilisants (SRF) ont été caractérisés chimiquement au laboratoire et testés par essai d'extraction séquentielle pour la dynamique de libération des éléments nutritifs (nitrates, phosphates, potassium, calcium et magnésium). Un essai en pot sur le maïs a été mis en place pour comparer l'efficacité agronomique de ces biochars-SRF (Biochar-SRF100, Biochar-SRF125 et Biochar-SRF150) à celle de l'apport de 4 g/poquet de NPK (125 kg/ha) selon un dispositif complètement randomisé. Il ressort de l'étude, que la concentration initiale de la solution de NPK impacte positivement la concentration finale en nutriments du biochar-SRF. La teneur en nutriments du biochar-SRF était de 6,5 à 7,8% pour l'azote et de 6-7,4% pour le potassium. Le phosphore avait un taux d'adsorption faible, soit 4,3-5% par rapport à l'azote et au potassium. A l'exception de l'azote, le rendement de l'activation était inférieur à 50%. Par ailleurs, le test d'extraction séquentielle a montré que le biochar-SRF relarguait moins de P et K que le NPK. Le cumul de libération des phosphates en une semaine était de 14% inférieur à celui du NPK. Les tests agronomiques ont révélé que Biochar-SRF125 et Biochar-SRF150 ont été plus performants que le Biochar-SRF100 et le NPK appliqué par microdose. Un surplus de 64 g de biomasse/plant a été obtenu avec le traitement Biochar-SRF125 comparé au NPK. Les résultats de cette étude, peuvent être utilisés comme références dans le développement d'un nouvel engrais à base de biochar, pour améliorer simultanément le rendement des cultures et réduire les risques d'acidification liés aux apports exclusifs des engrais minéraux. Néanmoins, la technique a besoin d'être optimisée pour accroître le rendement d'adsorption, en particulier celui des phosphates qui sont très limitants dans nos sols.

Mots clés : activation, efficiente d'utilisation des nutriments, biochar-SRF, adsorption, relargage des nutriments.

2.1. Introduction

La majorité des terres cultivables du Burkina Faso, présente des niveaux en nutriments trop faibles pour répondre aux besoins des cultures (Bado et al., 1997;

Koulibaly et al., 2015). Pour pallier les carences, la fertilisation minérale à base d'engrais NPK et d'urée est couramment utilisée par les petits producteurs pour satisfaire les besoins des cultures et soutenir la production agricole. Toutefois, le taux d'utilisation des engrais minéraux reste faible, du fait de leurs prix trop élevés par rapport au pouvoir d'achat des producteurs. Ce qui limite leur accès aux petits producteurs et accentue le rationnement et des pratiques de fertilisation suboptimale par rapport aux recommandations (Bationo et al., 2007; Pouya et al., 2013; Sanogo et al., 2020).

De plus, la forte solubilité de ces engrais combinée à leur épandage en surface, généralement pratiquée par les producteurs, occasionnent des pertes énormes et réduisent l'efficacité d'utilisation des nutriments par les plantes sur une longue période. En effet, la forte solubilité des engrais minéraux facilite leur lixiviation dans le sol au détriment des plantes. Les pertes en nutriments dans l'environnement sont énormes avec l'épandage des fertilisants en surface (Bandaogo et al., 2014). La conséquence directe est la faiblesse des rendements des cultures malgré que les engrais minéraux soient chaque année appliqués dans les champs (Bandaogo et al., 2015; Koulibaly et al., 2016).

L'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments constitue donc un moyen efficace pour accroître les rendements agricoles, même avec des quantités réduites d'engrais (Okebalama et Marschner., 2022). Les fertilisants à libération lente ou *slow release fertiliser* (SRF) en anglais, ont été largement utilisés à l'effet de réduire les quantités d'engrais de synthèse apportées, d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments et les rendements des cultures (Guan et al., 2014; Shi et al., 2020). Le concept SRF désigne un mécanisme selon lequel les nutriments de l'engrais sont sous une forme qui retarde leur disponibilité continue pour la plante après son application. Cela permet de prolonger la disponibilité des nutriments pour la plante beaucoup plus longtemps qu'un engrais soluble, tel que le nitrate d'ammonium ou l'urée, le phosphate d'ammonium ou le chlorure de potassium (Trenkel, 2010). L'efficacité des engrais SRF réside dans leur capacité à synchroniser la libération des nutriments avec la demande des plantes cultivées, en fonction de leurs stades végétatifs (AlShamaileh et al., 2018). Le relargage progressif des nutriments permet par conséquent de réduire les différentes formes de pertes de nutriments surtout l'azote dans les sols poreux, et donc de garantir des quantités suffisantes de nutriments tout au long du cycle de la culture (Dai et al., 2020). Parmi les formulations à libération lente (SRF) », les engrais enrobés de polymères ont montré une grande efficacité pour l'augmentation des rendements agricoles à travers une réelle synchronisation du relargage des nutriments et leur absorption par les cultures (Guan et al., 2014; Lawrencina et al., 2021). Malgré les nombreux avantages obtenus sous les parcelles amendées avec des formulations SRF, notamment ceux enrobés de polymère, leur vulgarisation à grande échelle a été limitée par des contraintes techniques et financières. La levée de ces contraintes est un impératif pour rendre la technologie accessible aux ménages ruraux à faibles revenus, et ce par la promotion des supports biodégradables et faciles d'accès comme le biochar (Hagemann et al., 2017; Panwar & Pawar, 2020).

Le biochar est un matériau stable obtenu par pyrolyse de la biomasse en absence ou sous limitation d'oxygène, connu pour ses aptitudes à améliorer la qualité des sols et d'adsorption active des nutriments et les rendements des cultures (Angsh & Sohi,

2013; Chew et al., 2020). Les avantages de l'apport du biochar-SRF sont particulièrement prononcés sous le climat tropical, où les sols sont fortement altérés avec de faibles réserves minéralogiques et très sensibles au lessivage (Gwenzi et al., 2018).

Au Burkina Faso, l'activité agricole génère annuellement d'énormes quantités de biomasses telles que les tiges de cotonnier, les rachis de maïs et les balles de riz, les coques d'anacarde et d'arachide, etc., dont seulement une infime partie est valorisée dans les constructions (balles de riz) ou convertie en énergie de cuisson (Ayite et al., 2014; Kataki et al., 2017). Une grande proportion est généralement brûlée sur place en début de saison d'hivernage, pour libérer l'espace cultivable. La diversité de biomasses disponibles assure un important potentiel de production de biochar profitable aux communautés à faibles revenus (Barry et al., 2021), pour amender les sols notamment avec du biochar-SRF. La présente étude vise à évaluer le potentiel d'un fertilisant à libération lente à base de biochar, et son aptitude à satisfaire les besoins des cultures dans les systèmes agricoles du Burkina Faso. La finalité de ce travail est d'utiliser le mécanisme de libération lente des nutriments pour réduire les quantités de NPK habituellement appliquées sur les cultures.

2.2. Matériel et méthodes

2.2.1. Production et caractérisation du biochar

Le biochar utilisé est issu de la pyrolyse de tiges de cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) dans un four *Kon-Tiki* (Schmidt et al., 2014) sous une température comprise entre 650 et 700°C. La caractérisation élémentaire et microscopique du biochar a été effectuée par le laboratoire Eurofins, selon les normes établies par "European Biochar Certificate" (EBC, 2012). Cette caractérisation a été complétée par une analyse SEM/EDX pour établir des informations sur la structure de surface et la composition chimique du biochar (Ma et al., 2016). L'analyse SEM/EDX a été réalisée à l'aide d'un e-Flash Bruker fonctionnant à 15 kV sur des particules de biochar de taille comprise entre 200 et 2000 µm. L'identification des éléments présents à la surface des particules a été faite en utilisant la technique EDX. Un diaphragme de 50 µm à différents zooms a permis d'établir une cartographie d'ensemble des pores des particules. La densité apparente du biochar (kg/m³) a été déterminée par la méthode analogue VDLUFA-A 13.2.1 (Brewer et al., 2014). Le principe consiste à calculer la densité apparente à partir des données obtenues d'un échantillon préalablement séché de masse et volume initiaux connus, contenu dans un cylindre et après avoir exercé dix compressions. Le pH du biochar a été mesuré au pH-mètre (DIN ISO 10390 (CaCl₂)), dans une suspension obtenue après une heure d'agitation d'un mélange de solution de CaCl₂ (0,01M) de biochar séché à l'étuve à 40°C selon un rapport poids/volume de 1/10 (EBC, 2012). La capacité de rétention d'eau (WHC) a été mesurée selon la méthode décrite par EBC (2012) norme E DIN ISO 14238-2011, et le pourcentage en masse de carbone et d'azote a été déterminé en utilisant un analyseur élémentaire TruSpec CHN (Schmidt et al., 2016).

2.2.3. Technique de production de fertilisants à libération lente à base de biochar (biochar-SRF)

Le biochar-SRF a été produit en utilisant du biochar de tiges de cotonnier préalablement séché à l'étuve comme support de nutriments, et une solution d'engrais NPK comme source de nutriments pour servir de fertilisant pour les cultures (Figure 11). Dans cette expérimentation, le NPK utilisé contenant 12% de N sous forme uréique, 10% de P et de 15,1% de K est un engrais obtenu par un mélange d'engrais simples ou "bulk blending" et couramment utilisé par les producteurs Burkinabè. Le biochar-SRF a été produit par macération (Schmidt et al., 2017). La technique consiste à imprégner le biochar de tiges de cotonnier par une solution nutritive obtenue par la dissolution de l'engrais NPK (Figure 12). Le mélange entre biochar et la solution nutritive a été fait sur la base d'un rapport volumique 1/0,5 choisi après des tests préliminaires. Ce rapport correspond à celui qui favorise une bonne macération du biochar avec peu ou sans reliquat de solution de NPK. Pour favoriser une imprégnation homogène, le mélange constitué est remué deux fois par jour à l'aide d'une spatule, puis laissé au repos dans un récipient fermé pendant 48 heures. Au bout de 48 heures, le mélange est essoré dans les entonnoirs munis de papiers filtres Whatman 602 H $1/2$ pour séparer le biochar-SRF du reliquat de la solution de macération. Le biochar-SRF produit est ensuite séché à l'ombre avant toute utilisation comme fertilisant (Figure 12-b).

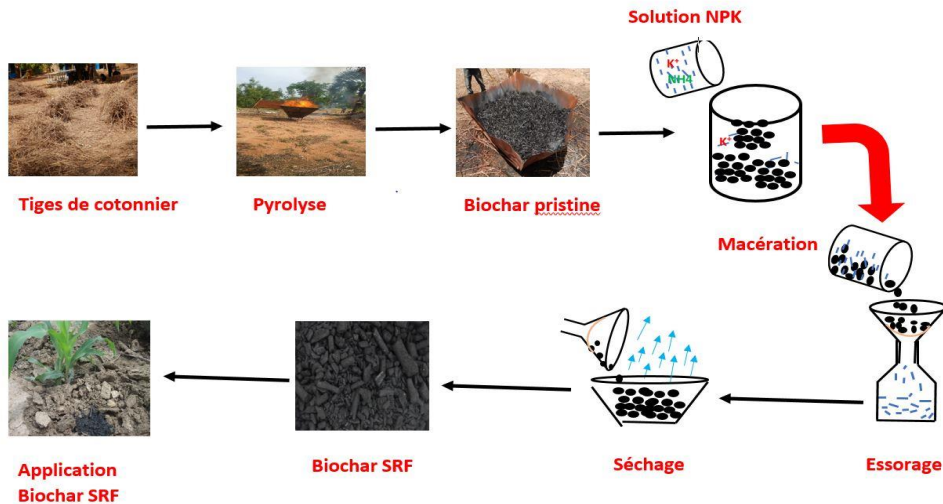


Figure 11: Schéma des étapes de la production et d'utilisation du biochar-SRF



Figure 12: Production (a) et séchage du biochar-SRF (b) (Cliché F. Saba, 2019)

2.2.4. Evaluation de la capacité d'adsorption des nutriments par le biochar

Pour évaluer la capacité d'adsorption des nutriments par le biochar, une quantité fixe de 100 g de biochar a été macérée pendant 48 heures dans 1,25 L de solution de NPK de concentrations croissantes (Tableau 1), obtenues par dissolution de 80, 100 et 120 g d'engrais NPK dans l'eau distillée. Ces quantités correspondent respectivement à 53, 80 et 96 g de NPK/L. Chaque niveau de concentration de la solution de NPK a été considérée comme un traitement, et répétée trois fois. Les quantités d'engrais utilisées correspondent respectivement aux doses d'engrais communément utilisées en milieu paysan par les petits producteurs au Burkina Faso en pratique conventionnelle, et en microdose dans les champs de maïs à savoir 100, 125 et 150 kg/ha. Les biochars-SRF obtenus de ces trois solutions sont respectivement nommés Biochar-SRF100, Biochar-SRF125, et Biochar-SRF150.

Tableau 1: Concentrations des solutions de NPK utilisées pour la macération

Traitements	Quantité de NPK utilisée pour 100g de biochar (g)	Type de nutriments	Dosage réel dans le NPK	Quantité de nutriments apportée (g)	Volume d'eau distillée utilisé (L)	Concentration de la solution (g/L)
Biochar-SRF100	80	N	12	9,6	1,25	7,7
Biochar-SRF100	80	P	10	8	1,25	6,4
Biochar-SRF100	80	K	15,1	12,1	1,25	9,7
Biochar-SRF125	100	N	12	12	1,25	9,6
Biochar-SRF125	100	P	10	10	1,25	8
Biochar-SRF125	100	K	15,1	15,1	1,25	12,1
Biochar-SRF150	120	N	12	14,4	1,25	11,5
Biochar-SRF150	120	P	10	12	1,25	9,6
Biochar-SRF150	120	K	15,1	18,1	1,25	14,5

Après séchage, des échantillons représentatifs ont été constitués par traitement, broyés pour déterminer le pH et la composition en éléments totaux (N, P, K, Ca et Mg) et ceux considérés comme biodisponibles. De même, les reliquats de macération ont été collectés pour quantifier les pertes liées à une absorption partielle de la solution nutritive.

Les éléments biodisponibles du biochar-SRF (P, K, Ca et Mg) ont été dosés après extraction à l'EDTA (0,02 M; pH=4,65) ; puis le phosphore a été dosé par colorimétrie, le K, Ca et Mg au spectromètre d'absorption atomique (Lakanen & Ervio, 1971). Les éléments totaux ont été dosés après une dissolution triacide (HF, HClO₄⁻ et HCl (10%)) sur un échantillon de 2 g de biochar broyé à 2 mm pendant 16 heures. Après dissolution, le résidu a été récupéré dans de l'acide chlorhydrique (HCl-10 %) dilué à l'eau distillée, puis filtré pour le dosage des nutriments : le phosphore a été dosé au spectrophotomètre, l'azote total a été déterminé par la méthode Kjeldhal (Hillebrand et al., 1953), et le pH par lecture directe au pH-mètre d'une suspension obtenue à l'eau distillée (pH-eau), et dans une solution de KCl (pH-KCl) dans un rapport de 1/5 (Pansu & Gautheyrou, 2003). Les données issues des analyses chimiques ont été utilisées pour évaluer l'efficacité de l'activation du biochar en calculant le pourcentage de gains en nutriments par le biochar pristine (PGn) et le rendement d'activation (Ra) de l'élément X (X= N, P, K, Ca, Mg) par le biochar. Ces indicateurs ont été évalués à partir des données issues de l'analyses du Biochar-SRF125 (que nous avons considéré comme traitement de référence utilisé pour l'expérimentation en plein champ) selon les formules suivantes :

$$PGn(X) = \left(\frac{A-a}{a} \right) * 100 \quad (1)$$

Avec

A : Masse de l'élément X contenue dans le biochar-SRF ;

a : Masse de l'élément X contenue dans le biochar pristine.

Le taux d'adsorption des nutriments issus de la dissolution du NPK ou le rendement d'activation du biochar (Ra), a été calculé selon la formule suivante :

$$Ra(\%) = \left(\frac{A-a}{X_n} \right) * 100. \dots \dots \dots (2)..$$

Avec :

A : Masse de l'élément X contenu dans le biochar-SRF (X= N, P, K, Ca et Mg) ;

a : Masse initiale de l'élément X contenue dans le biochar pristine;

X_n : Masse totale de l'élément X apportée par l'engrais NPK.

2.2.5. Test d'homogénéité des caractéristiques chimiques du biochar-SRF

Cet essai visait à vérifier si les flux de la solution NPK durant le temps de repos du mélange, ne créent pas des gradients d'hétérogénéité entre le biochar-SRF provenant de la base et celui de la surface du contenant de macération. Pour ce faire, nous avons procédé à l'activation du biochar dans un récipient en forme de cylindre (un fût) dont le volume a été subdivisé en trois parties égales de 10 cm (1=couche supérieure, 2=couche intermédiaire et 3=couche inférieure (Figure 13). A la fin du processus, le biochar provenant de chaque section a été soigneusement récupéré et séché séparément pour constituer des échantillons représentatifs, et y doser la concentration en éléments totaux (N, P, K, Ca et Mg) et en éléments biodisponibles. Le biochar a été activé avec une solution NPK (rapport massique 1/1) conformément au procédé décrit à la section 2.2.3.

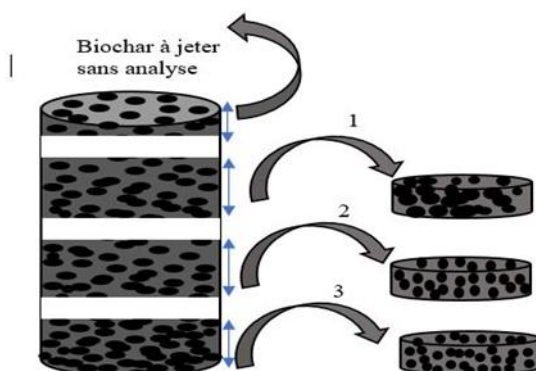


Figure 13: Schéma des points d'échantillonnage du biochar-SRF pour le test d'homogénéité
1 : échantillons provenant de la 1^{ère} couche ou couche supérieure ; 2 : échantillons provenant de la 2^{ème} couche ou couche intermédiaire, et 3 : échantillons provenant de la 3^{ème} couche ou couche inférieure

2.2.6. Suivi de la dynamique de relargage des nutriments du biochar-SRF

L'expérience visait à comparer les concentrations instantanées et les masses cumulées extraites de nitrates (NO_3^-), de phosphates (H_2PO_4^-), de potassium (K^+), de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) relarguées du biochar-SRF, du biochar pristine et de l'engrais NPK. Les nutriments ont été extraits à l'eau distillée et dans une solution de chlorure de calcium CaCl_2 (0,001M), via une expérience d'extraction séquentielle (Angsh & Sohi, 2013; Wang et al., 2015). La concentration de la solution de CaCl_2 a été choisie de sorte à préserver les propriétés de surface du biochar-SRF pendant la durée de l'expérimentation, et à maintenir une activité ionique de la solution proche de celle des sols étudiés au Burkina Faso. Pour ce faire, trois répliques de chaque fertilisant (Biochar-SRF125, biochar pristine et NPK) ont été complètement submergés dans un bécher contenant 250 mL de la solution d'extraction (eau distillée ou CaCl_2), puis agités manuellement avant d'être mis au repos. Après 48 heures, les premiers lixiviats ont été collectés par filtrage à l'aide des filtres en papier Whatman 602 H 1/2. Les séquences de collecte ont été répétées après 96, 168, 336 et 504 heures (Figure 14). A chaque pas de collecte, la solution extractive est renouvelée tout en

maintenant le substrat de départ. Les lixiviats collectés ont ensuite été analysés au laboratoire de Gembloux-Agro-Bio Tech, ULiège pour doser leur concentration en NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Les concentrations des lixiviats en NO_3^- , H_2PO_4^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été déterminées par spectrophotométrie, et celle de K^+ a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre à émission de flamme à 766 nm. Les données issues des analyses ont été utilisées pour générer des profils de relargage instantanés, et aussi sous forme de contenu massique cumulé pour chaque fertilisant en fonction du temps. La durée de l'expérience (trois semaines) a été choisie de sorte à vérifier si le biochar-SRF produit pouvait étendre le relargage de l'azote adsorbé sur cette période, correspondant à l'intervalle de temps entre l'application de la première dose d'azote par l'engrais NPK et la seconde dose par l'urée dans le système conventionnel de fertilisation en production du maïs.

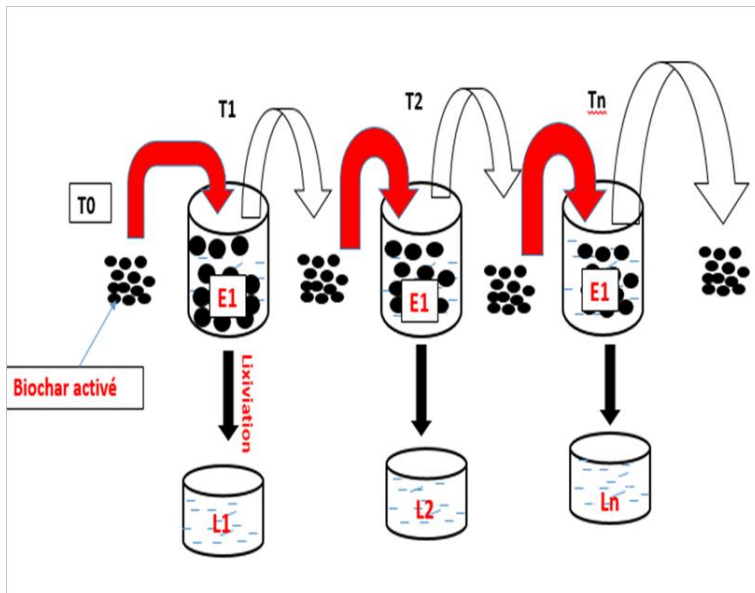


Figure 14: Schéma de collecte séquentielle de lixiviats de biochar-SRF

T0, T1...Tn : Temps de collecte de lixiviats, L1...Ln : lixiviat collecté du temps T1 à Tn, E1 : Extractant (eau distillée ou solution de CaCl_2) ; modèle adapté à Gwenzi et al. (2018)

2.2.8. Evaluation de l'efficacité des trois types de biochar-SRF

Après la caractérisation physico-chimique, un essai en pot a été conduit pour évaluer l'efficacité agronomique des biochars-SRF obtenus à partir de doses croissantes de NPK. Le sol utilisé a été prélevé dans la profondeur de 0-20 cm d'un Lixisol de la station de recherche de l'INERA Farako-Bâ. Chaque pot contenait 14,5 kg de sol et a été considéré comme un poquet. Un dispositif en bloc complètement randomisé comportant quatre traitements répétés chacun six fois a été mis en place. Les traitements étaient composés de NPK (témoin), du Biochar-SRF100, du Biochar-SRF125 et du Biochar-SRF150. Les fertilisants ont été tous appliqués par microdose

en raison de 4 g/pot (Tableau 2) à 14 jours après semis (JAS) sur des plants de maïs (variété *Barka*). L'effet des traitements a été déterminé au 45^{ème} JAS par des mesures de hauteurs et de biomasses séchées. Pour mesurer la biomasse sèche, les plants de maïs ont été fauchés à ras du sol pour séparer les parties aériennes et souterraines. Les racines ont ensuite été débarrassées de la terre par un lavage abondant à l'eau courante. Le poids de la biomasse a été déterminé après séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

Tableau 2: Quantités de N, P et K apportées par traitement et par pot

Traitements	Quantité appliquée/pot (g)	Quantité totale de N (g)	Quantité totale de P (g)	Quantité totale de K (g)
NPK	4	0,48	0,4	0,6
Biochar-SRF100	4	0,26	0,17	0,24
Biochar-SRF125	4	0,29	0,19	0,28
Biochar-SRF150	4	0,31	0,2	0,3

2.2.9. Analyse des données

Les données collectées sur les différents essais ont été soumises à une analyse de variance à un facteur, à l'aide du logiciel R (3.6.2). Les effets des différents traitements sur la concentration élémentaire en N, P, K, Ca et Mg ont été appréciés en utilisant la P-value au seuil 5%. La comparaison des moyennes entre les traitements a été effectuée par le test de Tukey. Les résultats de ces analyses ont permis d'apprécier la variation de la concentration élémentaire du biochar-SRF en fonction de la concentration initiale de la solution de NPK. Le package GraphER a été utilisé pour générer les profils de relargage instantanés et cumulés des nutriments.

2.3. Résultats

2.3.1. Caractéristiques physico-chimiques du biochar de tiges de cotonnier

Du point de vue physico-chimique, le biochar de tiges de cotonnier présente les caractéristiques suivantes : carbone (74,5%) ; hydrogène (2,9%) ; oxygène (14,2%), avec une capacité de rétention en eau (WHC) de 337% massique (Tableau 3). Selon les normes EBC, ce biochar contient des traces de métaux lourds, mais à des teneurs très faibles pour présenter une toxicité avérée au sol. La surface spécifique du biochar utilisé est considérée comme faible (1,7 m²/g) comparée à celles couramment rencontrées dans la littérature, qui sont en moyenne comprises entre 8 et 132 m²/g.

Tableau 3:Caractéristiques physico-chimiques du biochar de tiges de cotonnier

Paramètres mesurés	Valeurs
Densité apparente (kg/m ³)	70
Densité réelle (g/cm ³)	1,4
Surface spécifique (m ² /g)	1,7
Capacité de rétention en eau-WHC (% massique)	337
Carbone (%)	71,2
Hydrogène (%)	2,9
Oxygène (%)	14,2
H/Corg	0,49
O/C	0,150
Conductivité (μS/cm)	1220
Arsenic (mg/kg)	<0,8 (seuil<13)
Cadmium(mg/kg)	<0,2 (seuil <1,5)
Mercuré (mg/kg)	0,07 (seuil <1)
Plomb (mg/kg)	<2 (seuil 120)

L'analyse physico-chimique du biochar de tiges de cotonnier a mis en évidence une forte densité des pores de taille variable (Figure 15), dans lesquels sont logés des éléments minéraux (P, K, Ca, Mg, Al, Ca, Cl, Na, S, O et Si). La localisation des éléments minéraux et leur proportion varient d'un élément à l'autre (Figure 16). Ainsi, le potassium se trouve préférentiellement à l'intérieur des pores, tandis que le calcium se rencontre abondamment à la surface des particules de biochar.

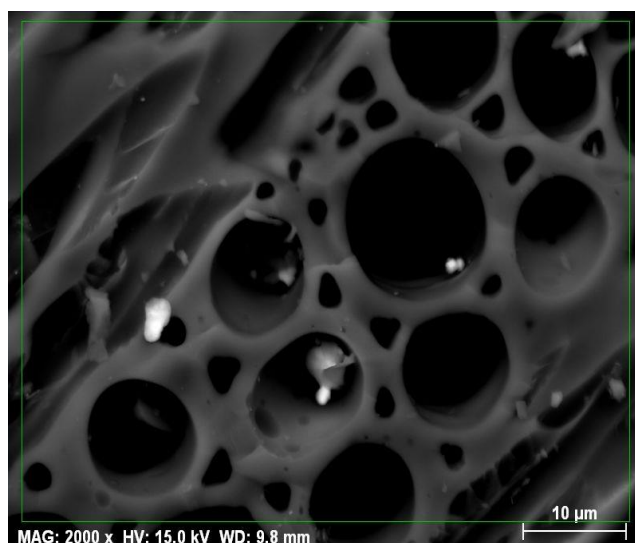


Figure 15:Illustration par l'analyse SEM/EDX de la densité porale du biochar de tiges de cotonnier

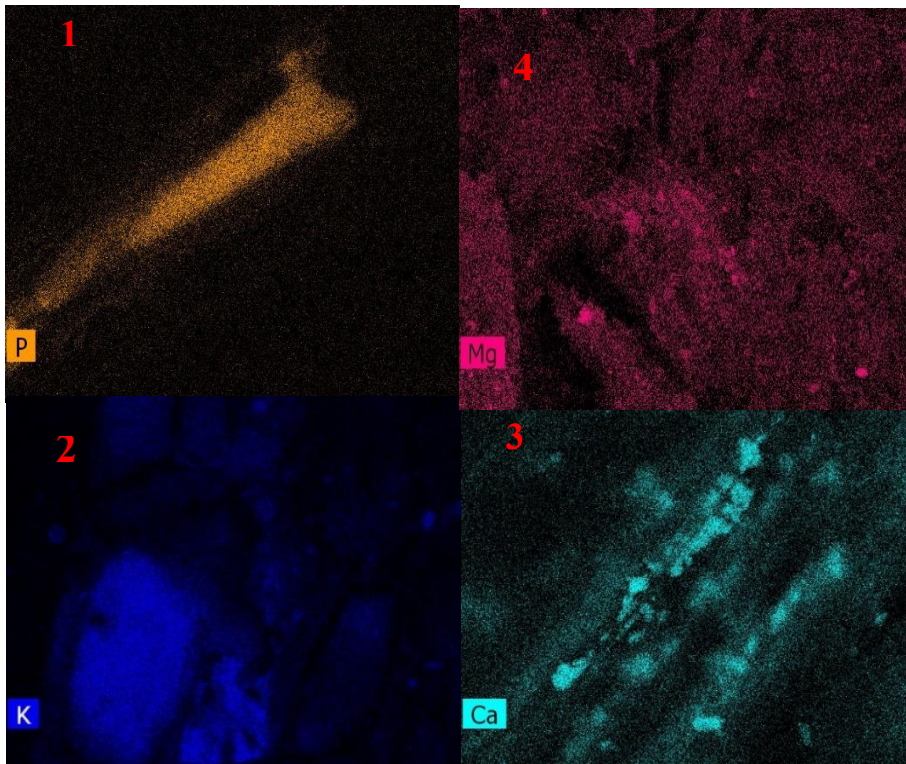


Figure 16 : Localisation (1) : du phosphore, (2) : du potassium (3) du calcium et (4) du magnésium dans la matrice du biochar de tiges de cotonnier selon l'analyse SEM/EDX

2.3.2. *Caractéristiques initiales du biochar et du NPK utilisés*

Les caractéristiques chimiques du biochar obtenu de la pyrolyse et celles de l'engrais NPK, sont présentées dans le Tableau 4. Les concentrations en N et P obtenues de l'analyse chimique du NPK utilisé sont globalement inférieures à celles déclarées. En plus des éléments essentiels, cet engrais NPK contenait 0,32% de carbone, du calcium et du magnésium en faible proportion. Le biochar obtenu après pyrolyse de tiges de cotonnier était alcalin (pH-eau = 9,9 et pH.KCl = 9,7), et présentait des concentrations totales en N, P et K de 0,7%, 0,41% et 5,1 %, respectivement.

Tableau 4 : Composition chimique initiale du biochar pristine et du NPK utilisés pour produire le biochar-SRF

Paramètres	Biochar pristine	NPK
pH-eau	9,9 ± 0,4	6 ± 0,1
pH-KCl	9,7 ± 0,02	5,9 ± 0,01
C_organique (%)	43 ± 0,8	0,32 ± 0,03
N_total (%)	0,7 ± 0,00	12 ± 0,03
P_total (%)	0,41 ± 0,03	10 ± 0,5
K_total (%)	5,1 ± 0,6	15,1 ± 0,8
Ca_total (%)	3 ± 0,1	0,21 ± 0,05
Mg_total (%)	0,6 ± 0,07	0,7 ± 0,05

C_organique: carbone organique, N_total: azote total, P_total: phosphore total, K_total: potassium total, Ca_total: calcium total, Mg_total: magnésium total

2.3.3. Evolution de la concentration élémentaire des nutriments dans le biochar-SRF

Les concentrations en éléments totaux et biodisponibles du biochar-SRF obtenu à partir de solution de NPK de concentrations croissantes, sont consignées dans le Tableau 5. Les résultats montrent que les traitements appliqués ont eu des effets significativement positifs sur l'évolution de la teneur totale de N, P et K du biochar. Ainsi, l'activation du biochar avec une solution de NPK de concentration équivalente à celle de 100 kg/ha de NPK (Biochar-SRF100), a amélioré la concentration en N, P et K du biochar de 9,3, 11 et 1,2 fois, respectivement comparativement à la concentration initiale avant l'activation. De même, les traitements appliqués ont induit des variations significatives sur les concentrations en N, P et K du biochar-SRF. Les concentrations du biochar-SRF en ces éléments sont systématiquement plus élevés avec l'augmentation de la dose de NPK dans la solution de macération. Ainsi, une augmentation de la dose du NPK de 100 kg/ha (Biochar-SRF100) à 150 kg/ha (Biochar-SRF150), fait passer le taux d'adsorption de N de 829 à 1014%, et celui de P de 949 à 1120%. Les tendances similaires ont été observées pour le P et le K biodisponibles du biochar-SRF. En comparant la concentration initiale de Ca et Mg dans le biochar pristine (biochar non traité) à celle du biochar-SRF, ces éléments ont subi une baisse durant le processus d'activation, passant de 3% pour le biochar pristine à 1,6% de calcium pour les traitements Biochar-SRF100 et Biochar-SRF150, soit une baisse de 47%.

Tableau 5 : Concentrations moyennes en éléments totaux et bio disponibles des biochars-SRF en fonction de la concentration initiale de la solution NPK

Traitements	Eléments totaux (%)					Eléments biodisponibles (%)			
	N	P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg
Biochar-SRF100	6,5 ^c ± 0,25	4,3 ^b ± 0,2	6 ^b ± 0,5	1,6 ^a ± 0,5	0,3 ^a ± 0,05	4 ^a ± 0,2	4,2 ^b ± 0,3	0,52 ^b ± 0,1	0,2 ^a ± 0,02
Biochar-SRF125	7,2 ^b ± 0,24	4,8 ^{ab} ± 0,2	7 ^{ab} ± 0,3	1,2 ^a ± 0,4	0,4 ^a ± 0,03	4,1 ^a ± 0,1	4,5 ^b ± 0,3	0,6 ^{ab} ± 0,1	0,2 ^a ± 0,01
Biochar-SRF150	7,8 ^a ± 0,1	5 ^a ± 0,4	7,4 ^a ± 0,4	1,6 ^a ± 0,5	0,4 ^a ± 0,03	4,1 ^a ± 0,2	5,2 ^a ± 0,3	0,65 ^a ± 0,1	0,2 ^a ± 0,01

Les moyennes affectées de la même lettre dans la même colonne, ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité de 5%.

2.3.4. Résultats des tests d'homogénéité des caractéristiques chimiques du biochar-SRF

Le Tableau 6 présente les caractéristiques chimiques (N, P, K Ca et Mg) des échantillons de biochar-SRF issus des couches inférieure, intermédiaire et supérieure du fût de macération. Seules les concentrations en azote total ($p=0,007$) et le potassium biodisponible ($p=0,02$) ont significativement varié en fonction de leur emplacement. Pour ces éléments, les échantillons provenant de la couche 3 étaient plus concentrés en nutriments que ceux de la partie supérieure (couche 1). La concentration en azote est passée de 7,4% pour la couche supérieure à 7,9% pour la couche inférieure, soit une variation de 7%. Les concentrations totales des autres éléments (P, K, Ca et Mg) étaient homogènes, quel que soit leur emplacement (Tableau 6).

Tableau 6 : Concentration élémentaire moyenne en éléments totaux et biodisponibles du biochar-SRF suivant les différentes couches

Traitements	Eléments totaux (%)					Eléments biodisponibles (%)			
	N	P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg
Couche supérieure	7,4 ^b ± 0,1	5,3 ^a ± 0,05	5,1 ^a ± 0,1	1,2 ^a ± 0,2	0,3 ^a ± 0,1	4,8 ^a ± 0,1	4,6 ^b ± 0,09	0,5 ^a ± 0,04	0,1 ^a ± 0,03
Couche intermédiaire	7,7 ^{ab} ± 0,1	5,3 ^a ± 0,5	5,1 ^a ± 0,1	1 ^a ± 0,1	0,3 ^a ± 0,1	4,9 ^a ± 0,1	5 ^a ± 0,1	0,4 ^a ± 0,06	0,1 ^a ± 0,04
Couche inférieure	7,9 ^a ± 0,2	5,8 ^a ± 0,2	5,2 ^a ± 0,6	0,9 ^a ± 0,1	0,3 ^a ± 0,1	5 ^a ± 0,06	4,6 ^b ± 0,06	0,4 ^a ± 0,05	0,1 ^a ± 0,04

Les moyennes affectées de la même lettre dans la même colonne, ne sont statistiquement différents au seuil de probabilité de 5% ;

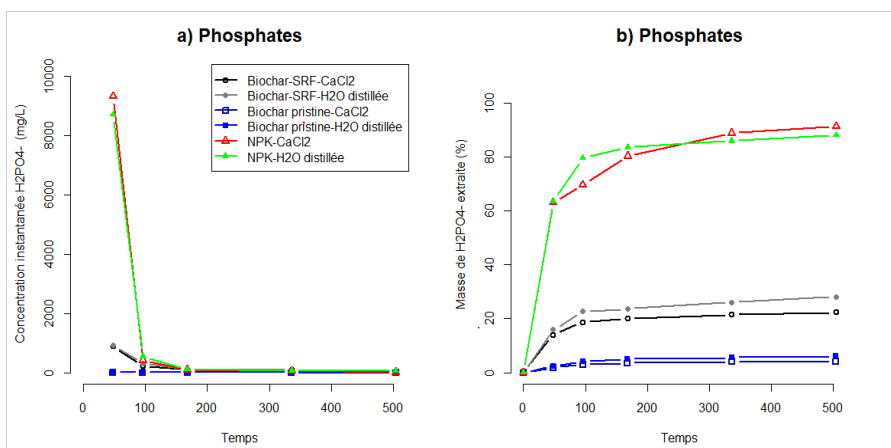
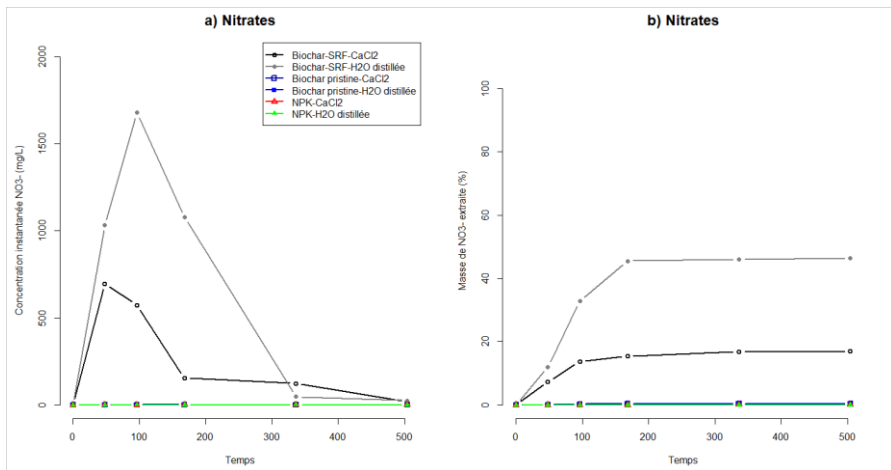
2.3.5. Capacité de relargage des nutriments à partir du biochar-SRF

Les résultats de l'essai d'extraction séquentielle (à l'eau distillée et au CaCl_2) du biochar-SRF125, ont révélé différents profils de relargage par type de nutriment et la solution d'extraction. En dehors du profil des nitrates du biochar-SRF qui présentent deux paliers importants, dont une première phase en début d'expérimentation (0-96 heures) illustrant une augmentation de la concentration en nitrates dans les solutions, puis une seconde phase correspondant à un relargage plus lent des nitrates. Les autres éléments ont eu des allures uniformes, avec une tendance au déclin (H_2PO_4^- K^+ et Ca^{2+}) ou à l'augmentation (Mg^{2+}) au cours du temps. Globalement, les quantités cumulées de nitrates, de phosphates et de potassium relarguées dans l'eau distillée après 504 heures étaient relativement plus élevées que celle dans la solution de CaCl_2 . Après 48 heures, le biochar-SRF a relargué 1033 mg de nitrates/L d'eau distillée, contre 696 mg/L avec la solution de CaCl_2 . Sur la même période, cela représente 885 mg/L et 920 mg/L de phosphate extrait au CaCl_2 et à l'eau distillée respectivement.

En comparant les profils de relargage des différents fertilisants, il ressort que le relargage de NO_3^- était significativement plus élevé pour le biochar-SRF comparativement au NPK et au biochar pristine, soit une quantité cumulée en 504 heures de 5,5, 0,04 et 0 g extraite à l'eau distillée respectivement du biochar-SRF, du biochar pristine et du NPK. Le pic de relargage des nitrates est atteint après 168 heures (Figure 17), au-delà desquelles, l'allure des courbes se stabilise pour l'ensemble des fertilisants avec des quantités extraites proches de zéro.

Contrairement aux nitrates, les profils de libération des phosphates et potassiums étaient caractérisés par un déclin général au cours du temps, avec un relargage plus important pour le NPK comparativement au biochar-SRF. La concentration instantanée de H_2PO_4^- à l'eau distillée après 48 heures, était de 920 mg/L pour le biochar-SRF contre 8714 mg/L pour le NPK. Après 504 heures (trois semaines), les quantités totales de H_2PO_4^- relarguées par le biochar-SRF dans l'eau distillée étaient d'environ 23% de sa composition initiale, contre 92% pour le NPK et 4,1% pour le biochar pristine. Contrairement aux phosphates, la proportion de K^+ libérée était plus élevée dans le biochar-SRF comparé au NPK, avec un épuisement quasi-total de leur stock au bout de 504 heures (3 semaines). Le cumul de K relargué dans le CaCl_2 était de 43, 85 et 54%, contre 57, 57 et 98% pour le K relargué dans l'eau distillée respectivement pour le biochar pristine, du biochar-SRF, et du NPK. Les pics de relargage de H_2PO_4^- et K^+ ont été atteints dans les 96 premières heures du début de l'expérimentation pour le NPK et le biochar-SRF. Contrairement aux autres éléments, les concentrations en magnésium dans la solution d'extraction contenant du biochar-SRF et du NPK avaient tendance à augmenter au cours du temps, tandis que celles du biochar pristine ont baissé.

Activation du biochar pour produire un slow release fertilizer (SRF) : une option de gestion efficace des nutriments



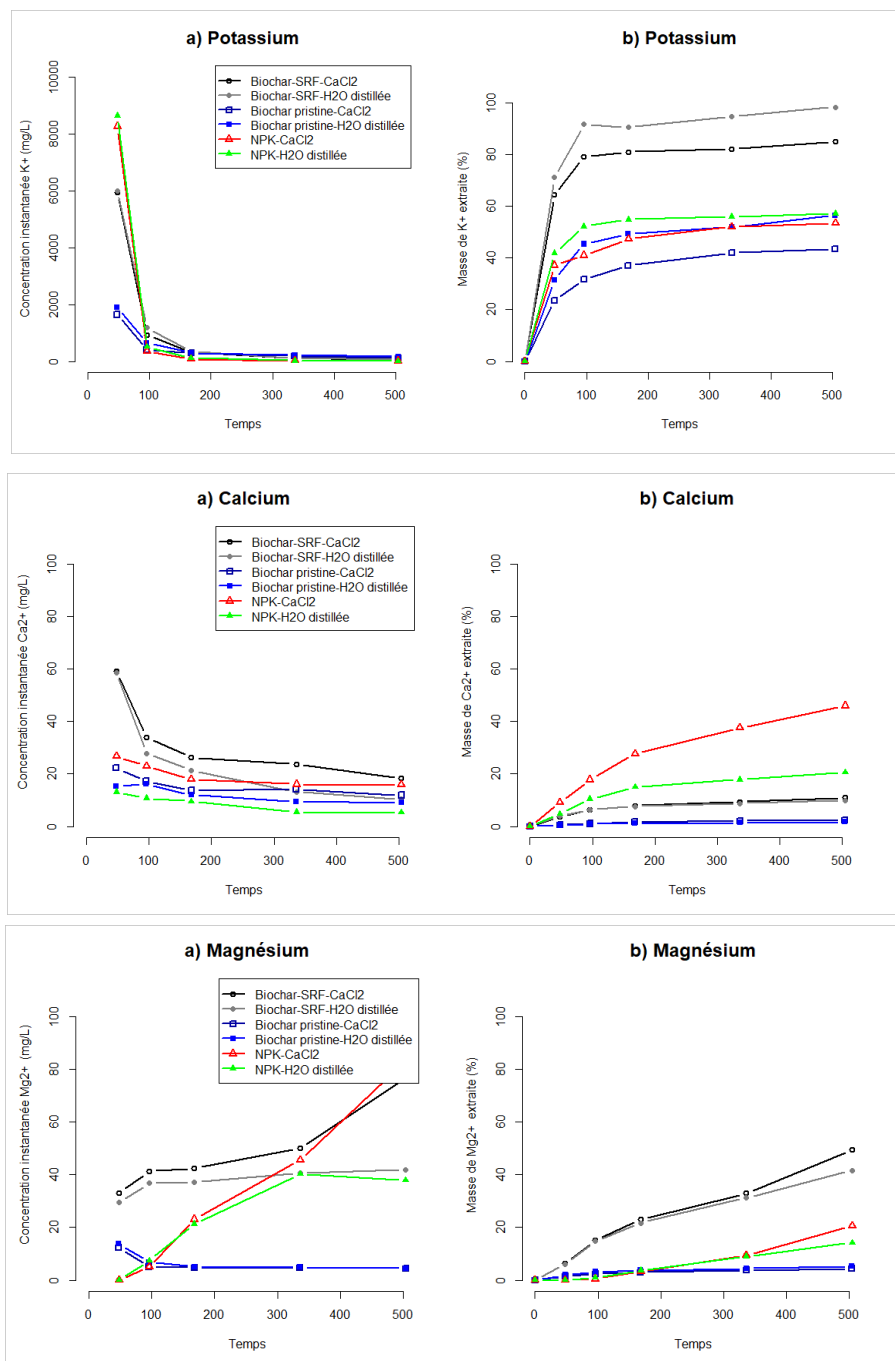


Figure 17: Libération instantanée (a) et quantité cumulée (b) de nitrates, phosphates, potassium, calcium et magnésium (extrait à l'eau distillée et au 0,001M CaCl₂) du NPK, du biochar-SRF et du biochar pristine pendant 504 heures

2.3.6. Performance de la technique de production du biochar-SRF

Les analyses des reliquats de macération ont montré des pertes significatives en P, K, Ca et Mg pour les trois types de biochar produit (Tableau 7). La proportion de Ca perdue dans les reliquats était assez élevée pour le Biochar-SRF100 (187%) par rapport au Biochar-SRF150 (162%). En comparant la quantité de P extraite dans le reliquat de macération aux apports initiaux en P par l'engrais NPK de chaque traitement, c'est l'équivalent de 9, 14% et 28% de perte en P. Ces pertes représentent 21, 24 et 25% des apports initiaux en potassium, respectivement pour le Biochar-SRF100, Biochar-SRF125 et le Biochar-SRF150.

Tableau 7: Proportion des nutriments perdus à travers le reliquat de la solution de macération du biochar

Traitements	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
Biochar-SRF100	9	21	187	2
Biochar-SRF125	14	24	173	1
Biochar-SRF150	28	25	162	12

Biochar-SRF100 : biochar-SRF obtenu avec une solution de concentration équivalente à l'apport de 100 kg/ha de NPK ; Biochar-SRF125 : biochar-SRF obtenu avec une solution de concentration équivalente à l'apport de 125 kg/ha de NPK et Biochar-SRF150 : biochar-SRF obtenu avec une solution de concentration équivalente à l'apport de 150 kg NPK/ha de NPK.

Le calcul des rendements d'activation (Ra) a montré de faibles niveaux d'adsorption en P et en K (<50%) des éléments dissouts du NPK. Seul le taux d'adsorption de l'azote dépasse légèrement 50% (54%) des apports totaux en azote de l'engrais NPK. Cela représente en termes de gain en nutriments, 929% d'azote pour le biochar pristine. L'activation du biochar a provoqué une baisse de la quantité de Ca et de Mg contenue dans le biochar pristine, passant de 3% et 0,6% à respectivement 1,2% et 0,4%, soit une baisse des quantités initiales de 60 et 33%.

Tableau 8: estimation des niveaux d'adsorption et de pertes théoriques de nutriments au cours de l'activation

Paramètres	N_total (%)	P_total (%)	K_total (%)	Ca_total (%)	Mg_total (%)
Contenu biochar pristine (a)	0,7	0,4	5,1	3	0,6
Contenu NPK (Xn)	12	10	15,1	0,21	0,7
Contenu biochar-SRF125 (A)	7,2	4,8	7	1,2	0,4
Contenu biochar-SRF125- Contenu biochar pristine (A-a)	6,5	4,4	1,9	-1,8	-0,2
Pourcentage de gain en nutriments PGn (%)	929	1100	37	-60	-33
Rendement d'activation Ra (%)	54	44	13	-857	-29

2.3.7. Efficacité des biochars-SRF sur le maïs

L'apport du biochar-SRF a eu des effets significatifs sur la hauteur des plants de maïs à 45 JAS, le poids racinaire, et la biomasse aérienne du maïs (Tableau 9). L'apport du Biochar-SRF100 a donné de plus faibles efficacités comparativement au témoin NPK seul. Les traitements Biochar-SRF125 et Biochar-SRF150 ont eu des effets similaires sur la hauteur des plants et la poids racinaire moyen du maïs. Par contre, la quantité de biomasse aérienne par plant a été plus élevée sous les pots amendés avec le Biochar-SRF150. Les hauteurs moyennes des plants à 45 JAS étaient de 116, 138 et 149 cm pour Biochar-SRF100, Biochar-SRF125 et Biochar-SRF150 respectivement. L'apport du Biochar-SRF150 a induit un surplus de biomasse aérienne de 64 g/plant, comparativement à l'apport de NPK pur par microdose.

Tableau 9 : Hauteur, poids sec des racines et biomasse aérienne moyens par plant de maïs à 45 JAS en fonction des traitements

Traitements	Hauteur 45 JAS (cm)	Poids racinaire à 45 JAS (g/plant)	Biomasse aérienne à 45 JAS (g/plant)
NPK	135 ^a ± 8,2	63 ^{ab} ± 6,6	216 ^b ± 21
Biochar-SRF100	116 ^b ± 6,4	50 ^b ± 7,9	121,3 ^c ± 34
Biochar-SRF125	138 ^a ± 9,2	67 ^{ab} ± 7,8	198 ^b ± 30
Biochar-SRF150	149 ^a ± 8,2	70,4 ^a ± 13	280 ^a ± 22

Les moyennes affectées de la même lettre dans la même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité de 5%. JAS : Jour Après Semis.

2.4. Discussion

2.4.1. Caractéristiques élémentaires du biochar-SRF en fonction de la concentration de la solution NPK

Les éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg) fournis par la dissolution de l'engrais NPK se retrouvaient à des proportions variables dans le biochar-SRF produit. De même, les analyses ont confirmé les fortes concentrations en carbone des biochars-SRF ; si bien que leur incorporation au sol pourrait contribuer progressivement au renforcement du stock de carbone du sol, pour lutter contre le réchauffement climatique (Chenu et al., 2019). Cela doit cependant être évalué sur le long terme étant donné les faibles doses appliquées, ainsi que pour s'assurer de minimiser tous effets négatifs sur les processus microbiens. La rétention des nutriments provenant du NPK dissout apporte à la fois des anions (H_2PO_4^-) et des cations (N-NH_4^+ , K^+), corroborant les travaux de Clough et al., (2013) et Yao et al., (2013), selon lesquels le biochar avait la capacité d'adsorber à la fois des anions comme les nitrates et des cations provenant de diverses sources de nutriments. Cela est possible grâce aux propriétés adsorbantes du biochar due à sa structure poreuse et lui permettant de piéger des substances nutritives diverses par un processus passif de transfert des nutriments de la phase liquide (solution de NPK) vers la phase solide (biochar) avec adsorption des solutés à la surface ou à l'intérieur des pores (Ali, 2014). En effet, la mise en contact

du biochar sec et poreux avec une solution concentrée conduit à la diffusion progressive des nutriments dans les micropores, suivant un gradient d'humidité (Downie et al. 2009). Après évaporation de l'eau, les substances adsorbées se cristallisent dans le biochar et ne sont relargués que lorsque le biochar est re-humecté. Par ailleurs, la teneur en nutriments du biochar-SRF produit était plus élevée lorsque la solution nutritive utilisée pour son activation était plus concentrée. En effet, la densité porale est l'une des propriétés du biochar influençant positivement sur le degré d'absorptivité des nutriments, en offrant d'avantages d'espaces de fixation aux nutriments (Schmidt et al., 2017; Gwenzi et al., 2018). Ainsi, l'adsorption des nutriments était plus élevée avec le Biochar-SRF150 par rapport au Biochar-SRF125 et Biochar-SRF100. En effet, (Melouki et al., 2020) rattachent cette forte adsorption des substances nutritives par le biochar à une augmentation de la surface spécifique du biochar induite par l'accroissement du rapport d'imprégnation qui favoriserait le développement des micro et mésoporosités des structures carboneuses. Certaines études rattachent l'accroissement de la surface du biochar soit à l'augmentation de la température de pyrolyse soit à un pré-traitement chimique (Leng et al., 2021). L'augmentation de la surface du biochar est L'obtention de biochar-SRF de différentes valeurs nutritives (N, P et K) à partir de doses croissantes de NPK de la présente étude, constitue un élément fort positif en matière de fertilisation des cultures, en offrant une alternative pour une utilisation plus efficace des nutriments apportés par fertilisation minérale. Les analyses chimiques du biochar-SRF ont révélé que l'ensemble des éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg) fournis par la dissolution de l'engrais NPK, se retrouvaient à des proportions variables dans les biochars-SRF produits. Cela montre que le biochar utilisé possède une grande capacité de stockage des nutriments ; toutefois, une étude approfondie de la porosité (taille, distribution et connectivité), de la surface spécifique, et de la chimie de surface des biochars produits serait nécessaire afin d'améliorer les performances nutritives des biochars-SRF (Schmidt et al., 2017; Gwenzi et al., 2018).

Dans la majorité des cas, le flux des nutriments entre le biochar (milieu poreux) et la solution en contact, est lié à phénomène cinétique rapide induit par un gradient de concentration entre les deux milieux, conduisant à une diffusion ou désorption depuis le solide (Barber, 1995; Lynch, 2005). La désorption du Ca^{2+} et Mg^{2+} au cours de l'activation serait donc attribuable à leur faible concentration initiale dans la solution de NPK utilisée pour l'activation, comparativement à celle du biochar pristine. L'étude a révélé des pertes d'environ 50% de Ca^{2+} et Mg^{2+} durant l'activation. Ce résultat met en lumière la coexistence de deux réactions simultanées adsorption/désorption au cours de l'activation du biochar (Tableau 4). Certains auteurs (Saleh & Hedia, 2018) attribuent ce mécanisme à la différence de rapport entre la charge et le rayon des éléments. Ces travaux rapportent que lorsque plusieurs éléments sont en concurrence pour un support, les éléments ayant un rapport charge/rayon plus faible interagissent plus facilement avant ; cela joue en défaveur des cations métalliques qui ont un rapport charge/rayon élevés, en plus de l'effet gradient diffusant les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} depuis le substrat vers la solution. Il est possible que le faible niveau d'adsorption des phosphates enregistré soit lié à la désorption de ces éléments. En effet, certains travaux (Yi & Chen, 2018; Arbelaez Breton et al., 2021) ont mis en évidence une grande affinité et des actions synergiques

entre la présence du magnésium/calcium à la surface du biochar, et le taux d'adsorption du phosphate. Selon ces auteurs, le prétraitement du biochar avec une solution riche en Mg et Ca augmenterait les charges positives de surface sur lesquelles se fixent préférentiellement les phosphates. Cette fixation des phosphates sur les cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) favorisent le plus souvent la précipitation du phosphore, le rendant insoluble et donc inaccessible pour les cultures (Novak et al., 2009; Ippolito et al., 2016).

La baisse de la composition en Ca^{2+} et Mg^{2+} pourrait être un atout pour augmenter la disponibilité du P provenant des engrais minéraux. Cependant, il est aussi connu que les bases associées (CaO et MgO) sont impliquées dans la neutralisation de l'acidité des sols du fait de leur caractère alcalin ; par conséquent, des moyens doivent être mis en œuvre pour limiter leur désorption lors de l'activation du biochar. Il nous semble donc capital de continuer à développer la recherche dans ce domaine, afin de mieux comprendre les interactions de surface liquide-solide et leur influence sur la chimie des différents éléments, et ce afin d'optimiser la stœchiométrie des nutriments au sein des biochars-SRF.

2.4.2. Efficacité du processus de production du biochar-SRF

Les caractéristiques chimiques du biochar-SRF ont révélé que l'activation a amélioré significativement la teneur en nutriments du biochar pristine, et que celle-ci variait fortement en fonction de la concentration de la solution. Ces résultats corroborent les études antérieures de Ahmad et al. (2018) et AlShamaileh et al. (2018), qui ont démontré que la composition initiale et les propriétés physiques du biochar notamment sa grande porosité sont des paramètres qui influencent positivement sur son degré d'adsorptivité des nutriments. Ainsi, en augmentant la concentration de la solution de macération, cela accroît la diffusion des nutriments (N, P et K) et leur adsorption dans les pores du biochar moins pourvu en ces nutriments. Cependant, les calculs des rendements d'activation ont montré qu'à l'exception de N, le taux d'adsorption des nutriments de la solution du NPK était faible (P et K), et même entraîne une désorption d'une partie du contenu initial (Ca et Mg) du biochar pristine (Tableau 8). Ces pertes qui ont lieu au cours de différentes phases de l'activation (essorage, séchage), se retrouvent dans le reliquat de macération montrant que le biochar de tiges de cotonnier a une capacité d'adsorption limitée, et dont la quantité maximale adsorbée est estimée à environ 68,9 mg de NO_3^- /g de biochar selon le coefficient isotherme de Langmuir (Q_0) (Rauw, 2018). Ce qui expliquerait l'étendue des pertes enregistrées à travers le reliquat de macération, montrant qu'une optimisation du processus pourrait permettre d'économiser théoriquement 25 à 50% des quantités d'engrais utilisées. Il se pourrait que l'utilisation de solution nutritive obtenue à partir de la dissolution du NPK affecte négativement le processus d'adsorption, du fait des compétitions entre les éléments présents en solution pour l'occupation des sites vacants. Cette optimisation doit aussi améliorer les propriétés de libération lente du biochar-SRF, car le relargage rapide des nutriments (P, K et Ca) observé durant l'expérience d'extraction séquentielle, réduit la capacité de fourniture en nutriments sur une longue période pouvant couvrir l'ensemble du cycle des cultures. Cela aurait le mérite de faciliter l'adoption de la technique de biochar-SRF en réduisant le nombre d'application des fertilisants (apporté actuellement en deux

fractions). Les caractéristiques du biochar-SRF obtenues dans nos conditions expérimentales (dynamique de relargage, taux d'adsorption des nutriments) sont en deçà des normes définies par le Comité Européen de Normalisation (CEN) des engrais-SRF, qui considère qu'un fertilisant possédant la pleine capacité de libération lente des nutriments ne relargue que moins de 15% des nutriments dans les 24 premières heures de son application, et pas plus de 75% de son contenu après 28 jours (Trenkel, 2010). Considérant que la dynamique de relargage a été étudiée via un test d'extraction séquentielle des nutriments par submersion directe du biochar-SRF dans l'eau distillée/ CaCl_2 , l'utilisation de ces normes pour évaluer le biochar-SRF produit à partir des normes obtenues de lixiviation en colonne de sol, pourrait créer un biais dans l'interprétation des résultats. Les résultats d'extraction séquentielle pourraient ainsi différer substantiellement de ce qui serait observé sur le terrain. Il serait souhaitable de poursuivre les tests d'optimisation (adsorption et relargage) du biochar-SRF en reproduisant des expériences de lixiviation de colonnes de sol, afin de se rapprocher des caractéristiques de terrain.

2.4.3. Dynamique de relargage des nutriments du biochar-SRF

L'expérience d'extraction séquentielle a montré que la libération des phosphates, du potassium et du calcium, était significativement plus élevée dans le NPK comparativement au biochar-SRF. La forte désorption obtenue avec le NPK pourrait s'expliquer par la forte solubilité des fertilisants NPK. En effet, il est connu des travaux de Benlamlih, (2019) que les engrais minéraux de synthèse sont généralement très libérant quasiment instantanément les nutriments, après mise en contact avec la solution du sol. Cela explique les pertes excessives observées en application directe des engrais minéraux au champ (AlShamaileh et al., 2018). Notons également qu'à l'exception du magnésium, une grande partie des nutriments est relarguée dans les premiers jours (48 à 96 heures) pour atteindre leurs pics de relargage au bout d'une semaine du démarrage de l'expérimentation. Cette rapide libération des éléments par le NPK et le biochar-SRF en début d'expérimentation, correspondrait au phénomène de rinçage des fractions de surface facilement accessibles, corroborant de fait, les résultats de (Angsh & Sohi, 2013; Gwenzi et al., 2018). En effet, ces auteurs avaient constaté un relargage excessif dans les premiers jours d'un essai de lixiviation séquentielle de biochar de différentes tailles et de biochar enrobé avec l'amidon, qu'ils ont attribué au phénomène de rinçage des cendres et des particules de surfaces du biochar-SRF. La cinétique de perte serait plus rapide pour des éléments adsorbés à la surface comme cela semble être le cas pour le P (Figure 16), comparativement à ceux adsorbés au sein des pores (Ca et K).

La quantité cumulée de NO_3^- désorbée par le biochar-SRF était significativement ($p < 0,05$) plus élevée comparativement à celle du NPK et du biochar pristine, en raison principalement du fait que l'ammonium est la principale forme de l'azote du NPK en phase aqueuse. Bien que le relargage de nitrates soit plus important avec le biochar-SRF, ceci s'est maintenu sur une période beaucoup plus longue (504 heures) comparativement aux phosphates et potassium, montrant ainsi que mécanisme de libération lente fonctionne mieux pour les nitrates. Cette libération lente s'expliquerait par une solubilisation lente des nutriments cristallisés dans les micropores du biochar après adsorption. En effet, le mouillage de matériau sec poreux comme le biochar fait

Intervenir des forces de conduction capillaire pour humidifier progressivement les pores interconnectés. En effet, lorsqu'on applique du biochar chargé en nutriments, les éléments adsorbés ne sont libérés que lorsque le sol atteint une certaine humidité susceptible de provoquer leur dissolution : la vitesse de diffusion dépend donc des caractéristiques du matériau (Fontecha-Camara et al., 2007; Goual et al., 2003). Du fait de la forte densité des micropores du biochar, la progression de l'humidité entre les pores interconnectés est lente, et expliquerait en partie la libération lente des nutriments adsorbés (Fontecha-Camara et al., 2007; Goual et al., 2003). Cette aptitude du biochar-SRF revêt une importance capitale pour améliorer la productivité des cultures surtout en production maraîchère, où des quantités énormes de N sont apportées par cycle de production. De même, les analyses de lixiviats ont révélé des quantités importantes de nitrates relarguées par le biochar-SRF, pourtant absentes dans le biochar pristine et le NPK. Cette soudaine apparition des nitrates dans les lixiviats pourrait s'expliquer par une probable conversion de l'ammonium (N-NH_4^+) adsorbé de la solution de NPK en nitrates par le biochar. Le taux de nitrification augmentant avec les valeurs de pH, nous supposons que l'alcalinité du biochar (pH 9,9) aurait pu favoriser cette réaction. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de le confirmer, étant donné que le NH_4^+ n'a pas été mesuré et nous n'avons pas non plus étudié les communautés microbiennes (considérées comme faibles dans le substrat synthétique) du substrat macéré. Il serait intéressant d'étudier l'effet de la présence des microorganismes nitrifiants dans les pores du biochar (Lehmann et al., 2011; Sun et al., 2016), ce qui est possible sur le terrain à cause de la colonisation des matrices du biochar au cours du séchage à l'air et à la surface du sol (Gul & Whalen, 2016) ou durant le stockage. La quantité cumulée de P extrait était non seulement faible, mais le relargage était plus étendu dans le temps comparé à celui du NPK. Ce relâchement lent pourrait permettre d'améliorer la disponibilité du P pour les plantes au cours de leur développement phénologique, et minimiser les pertes par lixiviation ou adsorption sur les oxydes de fer.

2.4.4. Efficacité agronomique des biochars-SRF en production de maïs

Les tests agronomiques ont révélé que les traitements ont eu des effets statistiquement significatifs ($p < 0,05$) sur la hauteur et la biomasse de maïs à 45 JAS. Les traitements Biochar-SRF125, Biochar-SRF150 et le NPK ont eu de meilleures efficacités sur ces paramètres. L'efficacité de ces traitements pourrait être attribuée à un apport suffisant et une bonne valorisation des nutriments, favorisés par la concentration des nutriments dans le système racinaire des plantes. Cela a favorisé une bonne nutrition, qui s'est traduite par un volume racinaire beaucoup plus important et une bonne croissance des plantes et une bonne production de biomasse. Il est connu des travaux de Tabo et al. (2011) et Ibrahim et al. (2016), que l'apport des engrais par microdose améliore l'efficacité d'utilisation des nutriments et assure un apport adéquat en azote, ce qui favorise le développement racinaire et la protection des plantes contre le stress hydrique de début de saison. Par ailleurs, le Biochar-SRF125 et Biochar-SRF150 ont produit des effets similaires au NPK, en dépit de leur plus faible apport nutritif par rapport au NPK. L'efficacité de ces traitements serait attribuable à la libération plus lente des nutriments, qui permet de répartir leurs effets au cours du temps et optimiser l'efficacité de leur utilisation par la plante. De

nombreux travaux ont montré que la libération lente des nutriments permet de mieux mobiliser les nutriments au profit des cultures, et par conséquent, elle constitue un facteur de productivité des cultures dans les sols dégradées (Guan et al., 2014; Wen et al., 2017). Les pots amendés avec le Biochar-SRF100 ont enregistré le plus faible poids racinaire et biomasse aérienne, comparés à l'apport de la même dose de l'engrais NPK. Ce faible rendement est en cohérence avec son faible apport en éléments nutritifs, comparativement aux autres traitements (NPK. Biochar-SRF 125 et 150). Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux évaluer les effets de ce traitement, étant donné que des travaux (Cui, 2007) ont révélé que seulement 2,5% d'azote total et 1,12 % de P disponible sont généralement utilisés pendant les premières phases du cycle du maïs (du semis à environ 45 JAS). Pourtant, le biochar-SRF100 contenait au départ une quantité de nutriments au-delà des besoins, soit 6,5% de N et 4% de P disponible pour boucler cette phase.

Considérant que plus de 90% des besoins en nutriments du maïs s'expriment au-delà de 45 JAS (floraison, remplissage de grains), l'introduction du biochar-SRF dans la zone Ouest pourrait être avantageux pour les petits producteurs pour améliorer la productivité des cultures, tout en limitant les coûts liés aux achats d'engrais. Ceci aurait comme avantage de réduire les doses d'engrais de synthèse d'au moins 25%, et de préserver les systèmes agricoles des apports abusifs d'engrais minéraux, source potentielle d'acidification des sols à long terme (Bonzi et al., 2008).

2.5. Conclusion partielle

Les perspectives d'application du biochar-SRF dans les sols cultivés, suscite un intérêt pour répondre à la baisse croissante de la productivité des sols. La présente étude visait à évaluer le potentiel du biochar de tiges de cotonnier à produire des engrais à libération lente à partir du NPK. Les résultats obtenus ont montré que les nutriments du NPK sont susceptibles d'être adsorbés par le biochar pristine, en fonction de la concentration de la solution NPK. L'activation a engendré une augmentation de la teneur en N, P et K du biochar pristine, de 18 à 1120%. Par contre, une baisse importante de Ca et Mg a été enregistrée au cours de l'activation du biochar. Ce qui sous-entend la coexistence d'un mécanisme adsorption/désorption durant l'activation du biochar, qui mériterait d'être mieux maîtrisé pour garantir la qualité du biochar-SRF. L'analyse des profils de relargage a montré une forte libération des nutriments dans les 96 premières heures de l'expérimentation, avec une tendance à l'épuisement du stock de P et K du biochar-SRF intervenant autour de la deuxième semaine. Cependant, cette dynamique pourrait être différente dans le sol, étant donné que les tests de désorption ont été réalisés par submersion à l'eau distillée et dans une solution CaCl₂. Malgré les pertes en nutriments enregistrées au cours de l'activation, les biochars-SRF obtenus ont montré une perspective intéressante pour la fertilisation du maïs. Mais des modifications supplémentaires doivent être apportées pour augmenter la teneur des nutriments du biochar-SRF, et booster le mécanisme de libération lente pour des applications à long terme. Si le biochar améliore la disponibilité en nutriments pour les cultures, cela pourrait être essentiel pour modifier le calendrier des apports d'engrais et réduire les doses à apporter dans les sols agricoles. Ces résultats offrent donc une solution de promotion des engrais à libération

lente, comme une alternative pour améliorer les rendements agricoles à moindre coût chez les petits producteurs.

2.6. *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)
- Angsh, E. T., & Sohi, P. S. (2013). Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy*, 5, 221–226. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12023>
- Ali, I. (2014). Water Treatment by Adsorption Columns: Evaluation at Ground Level, Separation & Purification Reviews, 43:3, 175-205, DOI:10.1080/15422119.2012.748671
- Arbelaez Breton, L., Mahdi, Z., Pratt, C., & El Hanandeh, A. (2021). Modification of hardwood derived biochar to improve phosphorus adsorption. *Environments - MDPI*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/environments8050041>
- Ayite, Y., Salami, A., & Bedja, K. (2014). Influence du taux de balles de riz sur la résistance a la compression des briques en terre. *African Journal Online*, 16 (3) 201.
- Bandaogo, A., Bidjokazo, F., Youl, S., Safo, E., Abaidoo, R., & Andrews, O. (2015). Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102(1), 79–89. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9653-6>
- Bandaogo, A., Fofana, B., Youl, S., Safo, E., Abaidoo, R., & Andrews, O. (2014). Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100/2. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9653-6>
- Barry, F., Sawadogo, M., Ouédraogo, I. W. K., Traoré, M. B., & Dogot, T. (2021). Geographical and economic assessment of feedstock availability for biomass gasification in burkina faso. *Energy Conversion and Management: X*, 13(September 2021), 100163. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100163>
- Benlamlih, Z. F. (2019). Évaluation d’une nouvelle génération d’engrais enrobés pour diminuer le lessivage des éléments minéraux et réduire les émissions de gaz à effet de serre (N₂O).
- Blessing, O., Ibrahim, A., Safo, E., Yeboah, E., Abaidoo, R., Logah, V., & Monica, U. (2017). Fertilizer micro-dosing in West African low-input cereals cropping: Benefits, challenges and improvement strategies. *African Journal of Agricultural Research*, 12(14), 1169–1176. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11559>
- 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>
- Bonzi, M., Lompo, F., Kiba, D. I., & Sédogo, P.M. (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. pp 83-98 in Bationo, A., Tabo, R., Waswa, B., Okeyo, J., Kihara, J., Fosu, M. and Kaboré, S. (eds.). 2008: Synthesis of soil, water and nutrient management research in the Volta Basin. Nairobi, Kenya: Ecomedia Ltd
- Bado, B. V., Sédogo, M. P., Cescas, M. P., Lompo, F., & Bationo, A. (1997). Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 6(571–575).
- Brewer, C. E., Chuang, V. J., Masiello, C. A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L. E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., & Davies, C. A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, 66, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059>
- Chew, J., Zhu, L., Nielsen, S., Graber, E., Mitchell, D. R. G., Horvat, J., Mohammed, M., Liu, M., van Zwieten, L., Donne, S., Munroe, P., Taherymoosavi, S., Pace, B., Rawal, A., Hook, J., Marjo, C., Thomas, D. S., Pan, G., Li, L., ... Fan, X. (2020). Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice. *Science of the Total Environment*, 713(November 2019), 136431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136431>
- Clough, T., Condon, L., Kammann, C., & Müller, C. (2013). A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020275>
- Cui, X. M. (2007). Soil testing and fertilizer recommendation in fertilizer application of corn. *Tech Advis Anim Husb*, 8(25).
- Dai, Y., Wang, W., Lu, L., Yan, L., & Yu, D. (2020). Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus. *Journal of Cleaner Production*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120573>
- Duhan, J. S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., Nehra, K., & Duhan, S. (2017). Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, 15(December 2016), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.03.002>
- EBC. (2012). Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland, Version 8.2E of 1st September 2019, 1–22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043>
- Fontecha-Camara, M. A., Lopez-Ramon, M. V., Alvarez-Merino, M. A., Moreno-Castilla, C. (2007). Effect of surface chemistry, solution pH, and ionic strength on the removal of herbicides diuron and amitrole from water by an activated carbon fiber. *Langmuir*, 23(3). pp1242-1247. DOI: 10.1021/la062200f
- Guan, Y., Song, C., Gan, Y., & Li, F. M. (2014). Increased maize yield using slow-release attapulgite-coated fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(3), 657–665. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0193-2>
- Gul, S., & Whalen, J. K. (2016). Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. In *Soil Biology and Biochemistry* (Vol. 103). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.08.001>

- Gwenzi, W., Nyambishi, T. J., Chaukura, N., & Mapope, N. (2018a). 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>
- Goual, SM., Bali, A., Quéneudec, M. (2003). Influence de la structure poreuse sur le transfert d'humidité dans les matériaux poreux de génie civil : application au béton argileux cellulaire. *Acte Séminaire International de Géomatériaux "GEOMAT'02" mars 2003 M'Sila-Algeria vol.1*, pp.299-312.
- 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>
- Hillebrand, W. F., Lundell, G. E. ., Bright, H. ., & Hoffman, J. I. (1953). *Applied inorganic analysis*, John Wiley(2 nd ed.), 1034p.
- Kataki, S., Hazarika, S., & Baruah, D. C. (2017). Investigation on by-products of bioenergy systems (anaerobic digestion and gasification) as potential crop nutrient using FTIR, XRD, SEM analysis and phyto-toxicity test. *Journal of Environmental Management*, 196, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.058>
- Koulibaly, B., Dakuo, D., Ouattara, A., Traoré, O., Lompo, F., Zombré, P. N., & Kouamé, A. Y. (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.
- Koulibaly, Bazoumana, Dakuo, D., Traore, M., Traore, O., Nacro, H. B., Lompo, F., & Sedogo, M. P. (2016). Effets de la fertilisation potassique des sols ferrugineux tropicaux sur la nutrition minérale et la productivité du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(2), 722. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i2.22>
- Lakanen, E., & Ervio, R. (1971). A Comparison of Eight Extractants for the Determination of Plant Available Micronutrients in Soils. *Acta Agralia Fennica*, 123, 223-232.
- Lawrencia, D., Wong, S. K., Low, D. Y. S., Goh, B. H., Goh, J. K., Ruktanonchai, U. R., Soottitawat, A., Lee, L. H., & Tang, S. Y. (2021). Controlled release fertilizers: A review on coating materials and mechanism of release. *Plants*, 10(2), 1–26. <https://doi.org/10.3390/plants10020238>
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Soil Biology & Biochemistry Biochar effects on soil biota e A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- 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.

- Leng, L., Xiong, Q., Yang L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment* 763 (2021) 144204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
- Ma, X., Zhou, B., Budai, A., Jeng, A., Hao, X., Wei, D., Zhang, Y., & Rasse, D. (2016). Study of Biochar Properties by Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(5), 593–601. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1146742>
- Okebalama, C.B & Marschner, B. (2022). Dry-aggregate stability and soil nutrients Responses to Reapplication of Biochar and Organic/Inorganic Fertilizers in Urban vegetable production. *Agronomy*, 12-1782. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081782>
- Pansu, M., & Gautheyrou, J. (2003). *L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale*. IRD Éditio.
- 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>
- Pouya, M. B., Bonzi, M., Gnankambary, Z., Traoré, K., Ouédraogo, J. S., Somé, A. N., & Sédogo, 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>
- Saleh, M. E., & Hedia, R. M. R. (2018). Mg-Modified Sugarcane Bagasse Biochar for Dual Removal of Ammonium and Phosphate Ions from Aqueous Solutions. *Alexandria Science Exchange Journal*, 39(1), 74–91. <https://doi.org/10.21608/asejaiqjsae.2018.5753>
- Sanogo, M., Gaspart, F., Kabore, D., & Taonda, S. J. (2020). The determinants of fertilizer microdosing adoption and impact on sorghum and maize yields in Burkina Faso. 11(6), 114–122. <https://doi.org/10.7176/JESD/11-6-13>
- Schmidt, H. P., Bucheli, T., Kammann, C., Glaser, B., Abiven, S., & Leifeld, J. (2016). European Biochar Certificate - Guidelines for a sustainable production of Biochar. In Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich (Issue June). [https://doi.org/DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043](https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043)
- 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>
- Schmidt, H., Taylor, P., Eglise, A., & Arbaz, C.-. (2014). Kon-Tiki flame curtain pyrolysis for the democratization of biochar production. *The Biochar Journal*, November 2014, 14–24. <http://www.biochar-journal.org/itjo/media/doc/1437139451142.pdf>
- 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>
- Sun, H., Zhang, H., Min, J., Feng, Y., & Shi, W. (2016). Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affect ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater. *Paddy and Water Environment*, 14(1). <https://doi.org/10.1007/s10333-015-0482-2>
- Tabo, R., Bationo, A., Amadou, B., Marchal, D., Lompo, F., Gandah, M., Hassane, O., Diallo, M. K., Ndjeunga, J., Fatondji, D., Gerard, B., Sogodogo, D., Taonda, J. S., Sako, K., Boubacar, S., Abdou, A., & Koala, S. (2011). Innovations as Key to the Green Revolution in Africa. *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa*. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2>
- Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T. J., Sherlock, R. R., & Condon, L. M. (2012). Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant and Soil*, 350(1–2), 57–69. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0870-3>
- 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>
- Wen, P., Wu, Z., Han, Y., Cravotto, G., Wang, J., & Ye, B. C. (2017). Microwave-Assisted Synthesis of a Novel Biochar-Based Slow-Release Nitrogen Fertilizer with Enhanced Water-Retention Capacity. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(8), 7374–7382. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01721>
- Yao, Y., Gao, B., Chen, J., & Yang, L. (2013). Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: Mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. *Environmental Science and Technology*, 47(15), 8700–8708. <https://doi.org/10.1021/es4012977>
- Yi, M., & Chen, Y. (2018). Enhanced phosphate adsorption on Ca-Mg-loaded biochar derived from tobacco stems. *Water Science and Technology*, 78(11), 2427–2436. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.001>

Chapitre 3

Effets de biochar-SRF sur les rendements du cotonnier et du maïs dans une rotation coton-maïs en milieu semi-contrôlé

Saba, F., Cornelis, J.-T., Sawadogo, H., Lefebvre, D., Bacia, R. K. I., Cisse, D., Bandaogo, A. A., Mamadou, T., & Nacro, H.-B. (2023). Nutrient-charged biochars increased nutrient-use efficiency in a cotton–maize rotation in Burkina Faso. *Agronomy Journal*, 1–18. <https://doi.org/10.1002/agj2.21283>

Chapitre 3. Effets de l'application du biochar-SRF sur le rendement du cotonnier et du maïs dans un système de rotation coton-maïs en milieu semi-contrôlé.

Résumé

L'épuisement du stock nutritif du sol et la faible efficacité d'utilisation des engrais minéraux, sont des facteurs explicatifs du faible rendement dans les agroécosystèmes du Burkina Faso. La promotion d'engrais à libération lente (SRF) à base de biochar issu du recyclage de tiges de cotonnier, pourrait améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments tout en réduisant les coûts liés à l'achat des engrais minéraux par les petits producteurs. Une expérimentation a été conduite pendant trois saisons culturales (2018-2020) dans une rotation coton-maïs à la station de recherche de l'INERA Farako-Bâ à l'ouest du Burkina Faso. Le dispositif expérimental était un bloc complètement randomisé avec cinq traitements, chacun répété quatre fois. Les traitements étaient composés de : T0 = Témoin (zéro fertilisation) ; T1 = pratique conventionnelle avec épandage de 2,5 t de compost/ha/an et de 150 kg de NPK/ha ; T2 = Microdose (4 g de NPK/poquet soit 125 kg/ha) ; T3 = Biochar-SRF (4 g de biochar-SRF/poquet soit 125 kg/ha) ; T4 = Biochar enrobé (4 g de biochar enrobé/poquet soit 125 kg/ha). L'étude visait à évaluer la capacité du biochar-SRF enrobé ou non de gomme arabique, à être utilisé comme un engrais en apport microdose pour l'amélioration de la croissance, les rendements et les paramètres chimiques des sols. Les résultats obtenus ont montré que les engrais SRF à base de biochar augmentaient de manière significative la teneur en carbone organique du sol (de 3,5 à 5 g/kg), ainsi que le phosphore et le calcium biodisponibles, sans pour autant améliorer les rendements du cotonnier comparativement à la pratique conventionnelle (T1) et au NPK appliqué par microdose (T2). Cependant, lorsque le biochar-SRF est enrobé de gomme d'*Acacia senegal* (L.willd) (T4), l'efficacité accrue de l'utilisation des nutriments conduit à une augmentation de l'efficacité agronomique de 109% rapport au biochar-SRF non enrobé (T3). Il convient donc de noter que l'efficacité accrue de l'utilisation de l'azote ne se traduit pas par une augmentation significative du rendement de maïs sous ce traitement, par rapport à la microdose de NPK pur et au biochar-SRF simple. Cela suscite d'approfondir l'étude sur de long terme, pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents de l'efficacité d'utilisation de l'azote. Malgré l'absence d'amélioration significative des rendements des cultures au cours des trois saisons de culture, l'étude a montré que sous climat sud-soudanien, l'utilisation d'engrais SRF à base de biochar enrobé peut être une solution efficace pour améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments dans les agroécosystèmes caractérisés par des sols appauvris à haut potentiel de pertes de nutriments.

Mots clés : efficacité d'utilisation des nutriments, fertilisants à libération lente, biochar-SRF, rendement des cultures, Burkina Faso.

3.1. Introduction

En Afrique subsaharienne, la baisse de la fertilité et de la productivité des sols constitue une menace importante pour la durabilité des agroécosystèmes et la sécurité alimentaire. Au Burkina Faso, la baisse de fertilité des sols va de pair avec des rendements agricoles de plus en plus faibles. A l'ouest du pays où les systèmes de production sont dominés par la rotation coton-maïs, les pratiques actuelles de gestion de la fertilité des sols reposent en grande partie sur l'utilisation d'engrais minéraux seuls ou en combinaison avec des amendements organiques comme le fumier ou le compost (Yaméogo et al., 2013; Amonmidé et al., 2021). Cependant, des études précédentes (Bationo et al., 2007; Bonzi et al., 2008; Sanogo et al., 2020) ont fait état d'un sous dosage des engrais minéraux pour des raisons de faible accessibilité, de coûts exorbitants, ainsi que de leur faible efficacité à améliorer les rendements des cultures, principalement à cause des contraintes pédologiques et climatiques. En effet, les sols tropicaux prédominants dans la zone, sont généralement caractérisés par une faible capacité de rétention des nutriments conduisant à un lessivage excessif ou à une forte immobilisation du phosphore, qui est retenu de manière presque irréversible sur les oxydes de fer (Lompo et al., 2008). Dans ce contexte, la combinaison d'engrais minéraux et du biochar obtenu à partir du recyclage de biomasses peu valorisées (tiges de cotonnier, rachis de maïs, balles de riz, etc.), apparaît comme une option durable pour améliorer la productivité des sols et l'efficacité de l'utilisation des nutriments (Kizito et al., 2019). Le biochar est un matériau très poreux et stable, riche en carbone, issu de la pyrolyse de la biomasse dans des conditions d'apport limité en oxygène et utilisé comme amendement du sol pour améliorer son fonctionnement (Lehmann & Stephen, 2009). Ces derniers temps, l'utilisation du biochar a suscité beaucoup d'intérêt en raison de ses effets positifs sur la séquestration du carbone dans le sol, ainsi que sa capacité à augmenter le pH, la capacité de rétention d'eau et la rétention des nutriments (Pandit et al., 2018; Gao et al., 2020; Joseph et al., 2021). Cependant, la plupart des effets positifs liés à l'utilisation du biochar à court terme, ont été obtenus avec l'application de grandes quantités, généralement supérieures à 10 t/ha (Jeffery et al., 2011 ; Hagemann et al., 2017), lesquelles ne sont généralement pas des doses durables car trop élevées par rapport à la biomasse disponible chez les petits exploitants. En plus, le coût du biochar pourrait conduire à un très faible retour sur investissement surtout dans la production céréalière (Clare et al., 2015), sans compter que la faible disponibilité de la biomasse dans les régions arides ne permet pas de satisfaire la production de biochar avec un rendement au four de l'ordre de 25 à 30% pour des taux d'application aussi élevés que 10 t/ha. Les apports de NPK par microdose ont donné des résultats très prometteurs dans la sous-région, où les rendements sont généralement faibles (Biielders & Gérard, 2015), mais avec des réponses agronomiques extrêmement variables dans l'espace (Ouedraogo et al., 2020). La promotion d'engrais à libération lente à base de biochar (biochar-SRF) peut donc être une solution durable pour améliorer les propriétés du sol et l'efficacité de l'utilisation des nutriments, dans le but d'augmenter le rendement des cultures. Le biochar-SRF est obtenu en combinant le biochar avec des substrats riches en nutriments tels que le compost, l'urine, les engrais minéraux (Schmidt et al., 2017). Ce mélange entraîne des interactions organo-minérales à la surface et dans la porosité

des particules de biochar, conduisant à une amélioration de ses propriétés fertilisantes car enrichi en N, P et K qui seraient libérés plus lentement dans la solution du sol pour une meilleure utilisation par les cultures (Schmidt et al., 2015; Gwenzi et al., 2018). Cela pourrait réduire les pertes de nutriments par lessivage, en synchronisant les phases de libération des nutriments et d'absorption par les cultures (AlShamaileh et al., 2018 ; Dong et al., 2019). Ces nombreuses qualités du biochar-SRF font que son apport au sol permet d'améliorer ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Toutefois, les performances des engrais à libération lente dépendent des propriétés du sol et de la culture, ainsi que du type de support des nutriments (Boguta et al., 2019 ; Lawrencja et al., 2021). Certaines études ont montré l'avantage d'enrober le biochar avec des substrats organiques pour améliorer son efficacité à fournir des nutriments sur de longues périodes, et pour améliorer la gestion des nutriments dans le sol (Wang et al., 2022). La présente étude vise à examiner les avantages agronomiques de l'application de biochar-SRF chargé d'engrais minéral (NPK) avec et sans enrobage organique (gomme d'*Acacia senegal*), dans des sols tropicaux très altérés (Lixisols) dans le bassin cotonnier ouest du Burkina Faso. Il s'agit de comprendre le rôle du biochar et de l'enrobage organique pour être utilisé comme un fertilisant SRF en application microdose, ce qui est une approche innovante dans le contexte agricole du Burkina Faso, où l'application conventionnelle de NPK est accompagnée de fortes pertes de nutriments par lixiviation et érosion. En raison de l'intérêt que pourrait susciter l'introduction du biochar-SRF chez les petits producteurs, nous avons émis les hypothèses que (i) le relargage progressif des nutriments par le biochar-SRF augmente l'absorption des nutriments par les plantes et de fait, améliore l'efficacité agronomique et le rendement ; (ii) l'enrobage du biochar-SRF avec de la gomme arabique durant l'activation, stimulerait l'adsorption des nutriments par le biochar et améliorerait les propriétés de SRF.

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Description du site expérimental

L'étude a été conduite pendant trois campagnes agricoles, de 2018 à 2020, à la station de recherches agricoles de Farako-Bâ. Cette station est située dans le bassin cotonnier de l'ouest du Burkina Faso (4°20 longitudes W, 11°06 latitude N, à 405 m au-dessus du niveau de la mer) (Figure 18)

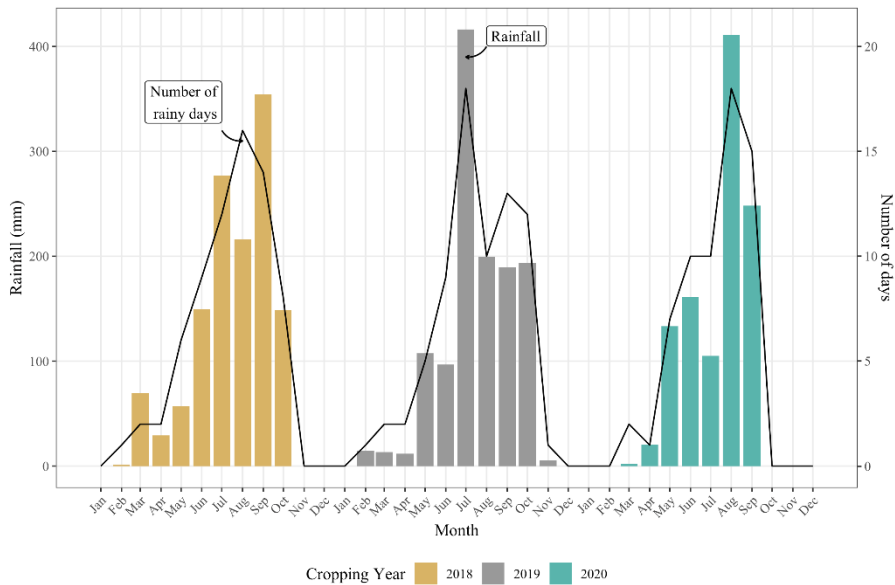


Figure 19: Hauteurs d'eau mensuelle (mm) et nombre de jours de pluie à Farako-Bâ de 2018 à 2020 (source : station météo Cimel de Farako-Bâ)

3.2.2. Variation interannuelle des précipitations et du rendement de coton

Au cours des dix années qui ont précédé le démarrage de la présente étude, les précipitations et les rendements moyens du coton grain ont connu une évolution mitigée (Figure 20). L'analyse de l'évolution du rendement moyen en coton graine dans la zone expérimentale (Houet) et au niveau national en fonction de l'indice de pluviométrie sur une période de dix années de 2009 à 2018 (Figure 20), montre qu'il n'existe pas de relation directe entre l'augmentation de la pluviosité annuelle et le rendement du coton. En effet, durant la décennie 2009-2018, la pluviométrie de la zone cotonnière a eu une tendance haussière contrairement au rendement en coton graine qui n'a cessé de chuter. Par exemple en 2017 où l'indice de pluviométrie avoisinait -2, le rendement moyen en coton graine a connu une hausse d'au moins 100 kg/ha. Ce constat nous conforte à proposer des pratiques de fertilisation durable, principal facteur explicatif de la variation des rendements dans la zone d'étude.

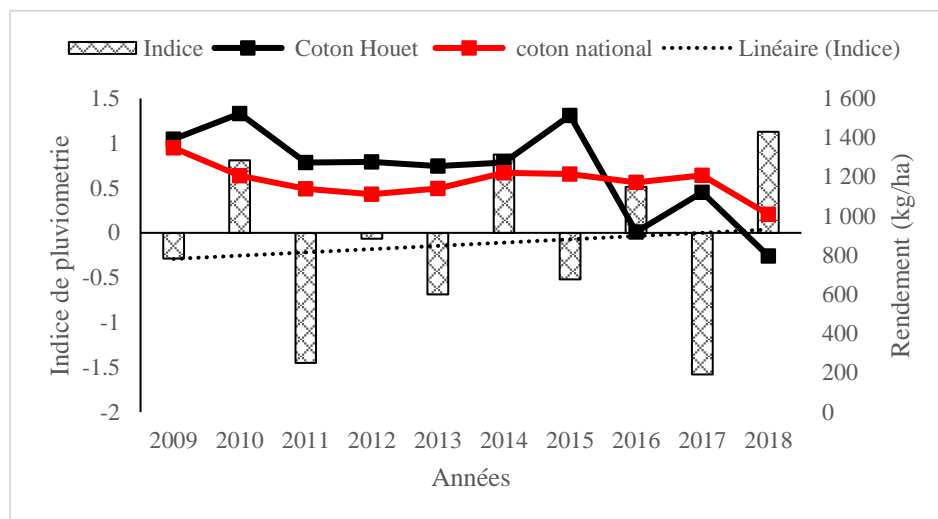


Figure 20: Indice pluviométrique et rendement moyen du coton de 2008 à 2018 (source de données : DRAAH-Hauts bassins)

3.2.3. Comparaison de l'état de fertilité du sol expérimental avec des sols de même type de la zone

Les Lixisols et les Ferralsols sont les deux principaux types de sol rencontrés dans la station de Farako-Bâ (Pallo, 1996). Ce sont des sols acides, chimiquement pauvres en matière organique (<1%) et en éléments minéraux essentiels N, P et K (Bado, 2002). L'essai a été implanté sur un Lixisol (WRB-IUSS, 2014) après une jachère de 5 ans. Les résultats de l'étude de base montrent que le sol expérimental a une texture sablo-limoneuse ($73 \pm 1,6\%$ de sable, $18 \pm 0,6\%$ de limon et $9 \pm 0,9\%$ d'argile) ; avec de faibles valeurs de pH (pH-KCl = $4,3 \pm 0,05$, pH-H₂O = $5,4 \pm 0,1$). La teneur en éléments nutritifs biodisponibles (P, K, Ca et Mg), l'azote total (0,03 %) et la capacité d'échange cationique (CEC) ($1,9 \text{ cmolc.kg}^{-1}$) étaient également faibles (Tableau 10).

Tableau 10 Caractéristiques physico-chimiques du sol à la mise en place de l'essai (Farako-Bâ).

Paramètres	Profondeur 0-20 cm
Sable (%)	73 ± 1,6
Limon (%)	18 ± 0,65
Argile (%)	9 ± 0,95
pH-H ₂ O	5,4 ± 0,1
pH-KCl	4,3 ± 0,05
Carbone Organique (g/kg)	3,8 ± 0,08
Azote total (g/kg)	0,3 ± 0,0
Ratio C/N	127 ± 12
Phosphore biodisponible (mg/kg)	0,6 ± 0,03
Potassium disponible (mg/kg)	49,3 ± 0,6
Calcium disponible (mg/kg)	94,3 ± 0,6
Magnésium disponible (mg/kg)	32 ± 1,4
CEC (cmolc/kg)	1,9 ± 0,1

La comparaison de ces données de référence avec les données issues d'analyses d'échantillons prélevés dans la même région agricole, sur les mêmes types de sols des sites de Koumbia et Massala (Cisse, 2022), et les valeurs critiques de ces paramètres définies par le BUNASOLS, (1990) pour la zone de production, montrent que l'essai a été implanté sur un sol dans un état de dégradation avancée (Figure 21). Exception faite de la valeur du pH, les concentrations de tous les autres paramètres (N, P, K, CEC, MO) sont en dessous des valeurs limites tolérables pour la production agricole.

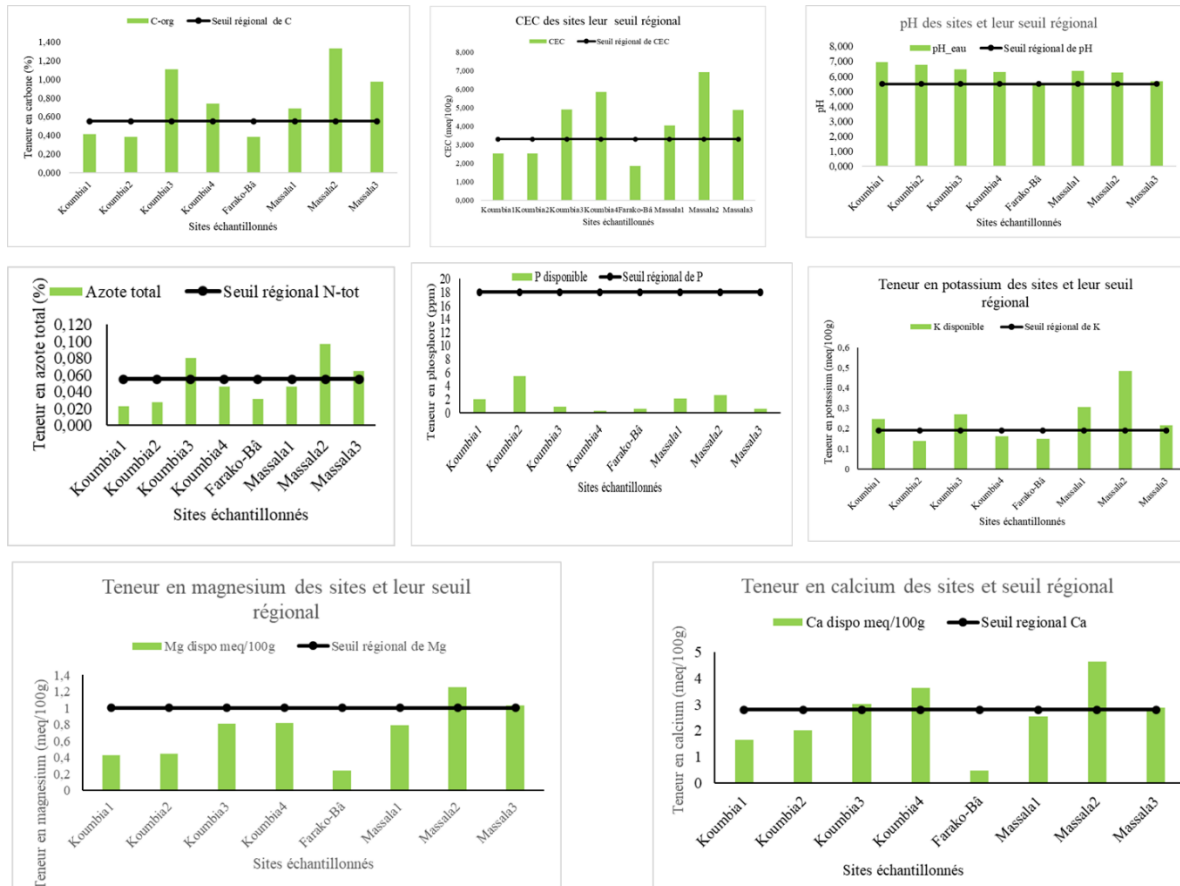


Figure 21: Etat de fertilité du sol expérimental comparé aux sols de mêmes types des sites de Koumbia et Massala

3.2.4. Matériel végétal et fertilisants utilisés

Le matériel végétal utilisé était composé du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) et du maïs (*Zea mays* L.). La variété de cotonnier *FK-64* avec un cycle de 150 jours et 2,8 t.ha⁻¹ comme rendement potentiel (Bourgou et al., 2020), et la variété de maïs *Barka* avec un cycle moyen de 80 jours et un rendement potentiel de 5,5 t.ha⁻¹ (CNS, 2014) ont été utilisées. Ces variétés sont couramment utilisées par les producteurs de la zone ouest, du fait de leur adaptabilité au climat et au type de sol, leur bonne réponse à la fertilisation et leur bon rendement. Ces deux variétés ont été cultivées suivant une rotation coton-maïs-coton.

Dans la présente étude, il a été utilisé le biochar enrichi en nutriments à travers la solution de NPK (biochar-SRF), et le biochar-SRF enrobé de gomme d'*Acacia* comme potentiel fertilisant à libération lente (SRF), en vue d'améliorer l'efficacité de la fertilisation par microdose dans le continuum sol-culture. En plus du biochar, des engrais minéraux conventionnels constitués du NPK de formule 14-23-14 et de l'urée [CO (NH₂)₂] dosant 46% d'azote ont été utilisés, avec le compost comme fertilisant organique. Le biochar utilisé dans la production du biochar-SRF avait des propriétés alcalines (pH-eau = 9,8) et faiblement pourvu en azote (<1%) et en phosphore (4 g/kg). Sa concentration en potassium (51 g/kg de biochar) était relativement élevée comparée aux autres éléments majeurs. La gomme d'*Acacia* utilisée pour l'enrobage du biochar-SRF, était acide (pH-eau =4,14) et moyennement pourvu en calcium (17,2 g/kg). Le compost contenait 1,7% de N, 2,6 de P total et 14 g/kg de K total pour un pH-H₂O de 7,9 (Tableau 11).

Tableau 11: Teneurs en éléments nutritifs du biochar pristine de la gomme arabique et du compost utilisés dans l'expérience

Paramètres	Biochar pristine	Gomme arabique	Compost
Carbone organique (%)	42,3 ± 8	32,4 ± 4	15,4 ± 2,6
N_total (%)	0,69 ± 0,1	0,32 ± 0,00	1,7 ± 0,2
P_total (%)	0,4 ± 0,03	0,01 ± 0,01	0,3 ± 0,03
K_total (%)	5,1 ± 0,7.	0,5 ± 0,00	1,4 ± 0,02
Ca_total (%)	3 ± 0,1.	1,7 ± 0,3.	0,94 ± 0,02
Mg_total (%)	0,6 ± 0,7	0,14 ± 0,00	0,51 ± 0,04
pH-H ₂ O	9,8 ± 0,4	4,1 ± 0,1	7,9 ± 0,1

Les valeurs suivant le signe ±, représentent l'écart type. N_total: azote total, P_total: phosphore total, K_total: potassium total, Ca_total: calcium total, Mg_total: magnésium total, pH-H₂O: pH eau.

3.2.5. Production et enrichissement du biochar en nutriments

Le biochar utilisé a été obtenu par pyrolyse de tiges de cotonnier dans un four *Kon-Tiki* sous limitation d'oxygène (Schmidt et al., 2014). La température de pyrolyse était comprise entre 650 et 700 °C. Le biochar obtenu a ensuite été enrichi en nutriments par macération avec une solution dissoute de l'engrais NPK dans un rapport volumique biochar/solution NPK de 1/0,5 ; pour produire un engrais à libération lente

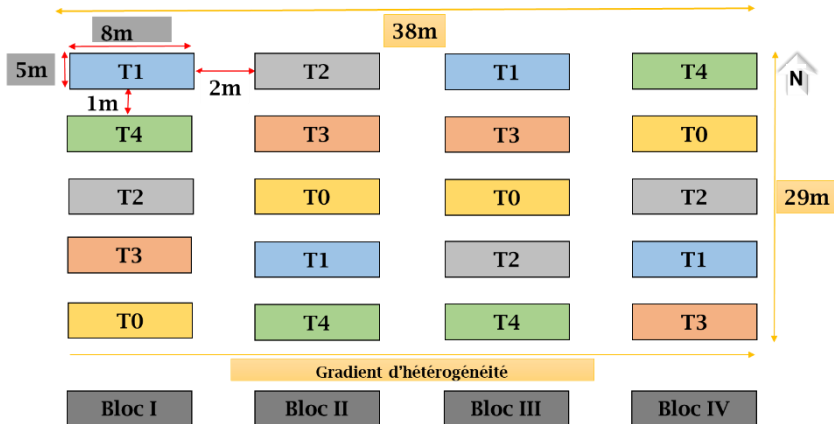
à base de biochar (biochar-SRF). Pour la production de 125 kg de biochar-SRF nécessaire pour amender un hectare en microdose, 375 L d'eau distillée a été utilisée pour dissoudre 125 kg de NPK. Ce qui donne une concentration massique de 47, 35 et 52 g/L respectivement pour N, P et K pour le NPK utilisé. Un deuxième type de biochar-SRF a été obtenu en enrobant le biochar enrichi en nutriments avec de la poudre de la sève d'*Acacia senegal* (L. willd). La poudre d'*Acacia senegal* (L. willd) communément appelée gomme arabique, est une substance biodégradable couramment utilisée comme additifs dans les industries agroalimentaires et aussi pour l'enrobage des semences avec des engrais en application microdose dans la zone sahélienne (Kiari et al., 2014). La poudre de gomme arabique a été ajoutée au mélange de solution nutritive et de biochar, dans un rapport pondéral de 1/0,4 à la fin du processus d'activation. Le mélange bien agité, est conservé dans un récipient fermé pendant au moins 48 heures dans des conditions ambiantes. Durant le processus, le mélange est régulièrement retourné après chaque six heures de temps, à l'aide d'une spatule ou de fourche pour bien l'homogénéiser et favoriser les interactions des nutriments avec le biochar. A la fin de la réaction, le biochar-SRF est essoré puis séché à l'ombre jusqu'à évaporation complète de l'eau avant son utilisation comme engrais. L'ensemble des fertilisants testés ont été analysés pour déterminer leur composition en éléments nutritifs, N total et (P, K, Ca et Mg) biodisponibles et la concentration en C-org. Après la caractérisation chimique, la dynamique de relargage de nutriments du biochar-SRF, du biochar enrobé et de l'engrais NPK, a été aussi testée au laboratoire par la méthode d'extraction séquentielle décrite par (Wang et al., 2015) (voir chapitre 2). Cette expérience consistait à ajouter 20 g de chaque fertilisant (biochar-SRF, biochar enrobé et NPK) dans un bécher contenant 250 mL d'eau distillée. La suspension formée est manuellement agitée puis laissée au repos pendant 48 heures, au bout desquelles les premiers lixiviats ont été collectés par filtrage au moyen de papiers filtres Whatman 602 H ½. Une collecte séquentielle a été répétée après 96, 168, 336 et 504 heures. A chaque étape de collecte, l'eau distillée a été renouvelée tout en conservant le même échantillon de départ. Les lixiviats collectés ont ensuite été analysés pour doser la teneur en nutriments (N-NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+).

3.2.6. Dispositif expérimental

L'étude a été conduite dans un dispositif en blocs randomisés comprenant cinq traitements répétés quatre fois (Figure 22). Chaque parcelle élémentaire mesurait 8 m de long sur 5 m de large, soit une superficie de 40 m². Les traitements étaient séparés entre eux par une allée de 1 m et les blocs par 2 m. Les traitements étaient composés de :

- T0 = Témoin (zéro fertilisation) ;
- T1 = Pratique conventionnelle (2,5 t.ha⁻¹.an⁻¹ de compost + 150 kg.ha⁻¹ de NPK;
- T2 = Microdose (4 g/poquet de NPK soit 125 kg.ha⁻¹)
- T3 = Biochar-SRF (4 g/poquet de biochar-SRF soit 125 kg.ha⁻¹) ;
- T4 = Biochar enrobé (4 g/poquet de biochar enrobé soit 125 kg.ha⁻¹).

Tous les traitements ont reçu un apport supplémentaire d'azote sous forme d'urée par microdose pour les traitements T2, T3 et T4 en raison de 2 g/poquet (62,5 kg/ha) pour le maïs et 1 g/poquet (31,25kg/ha) pour le coton. Le traitement T1 a reçu 50 et 100 kg d'urée/ha respectivement pour le coton et le maïs. Les apports en éléments fertilisants des différents traitements sont résumés dans le tableau 12



T0 = Témoin sans fertilisation ; T1 = Pratique conventionnelle (2,5 t/ha de compost/an + 150 kg/ha de NPK+50 kg/ha d'urée pour le coton et 100 kg/ha d'urée pour le maïs) ; T2 = Microdose (125 kg/ha de NPK + 62.5 kg/ha d'urée pour le maïs et 31.125 kg/ha pour le coton) ; T3 = Biochar- (125 kg/ha de biochar-SRF/ha + 62.5 kg/ha d'urée pour le maïs et 31.125 kg/ha pour le coton) ; T4 = Biochar-enrobé (125 kg de biochar-enrobé/ha+ 62.5 kg/ha d'urée pour le maïs et 31.125 kg/ha pour le coton)

Figure 22:Schéma du dispositif expérimental de l'essai à la station de Farako-Bâ.

Tableau 12: Composition des traitements, et quantités de N, P et K apportées par type de fertilisants et par traitement.

Traitements	Compost	NPK	Biochar-SRF	Biochar-enrobé	Urée		Quantité de N, P & K apportée par traitement		Technique d'application
	kg.ha ⁻¹						kg.ha ⁻¹		
	Coton/maïs			Coton	Maïs	Maïs	Coton		
Témoin (T0)	0	0	0	0	0	0	0	0	NA
Pratique conventionnelle (T1)	2500	150	0	0	50	100	92,1N +22,4P+58,4K	77,7N +22,4 P+58,4 K	Epandage
Microdose (T2)	0	125	0	0	31,25	62,5	46N+13,3P +19,5K	32 N+13,3P +19,5 K	Microdose
Biochar-SRF (T3)	0	0	125	0	31,25	62,5	40N+3,4P+ 18,6K	26 N+3,4 P+ 18,6 K	Microdose
Biochar enrobé (T4)	0	0	0	125	31,25	62,5	37,3N+3,5P+ 16,5K	22,9 N+3,5 P+16,5 K	Microdose

NA: non applicable

La microdose d'engrais minéraux est une technique qui consiste à appliquer de petites quantités d'engrais dans les poquets de semis. Ce type d'application d'engrais permet de maximiser l'efficacité d'utilisation des nutriments par les cultures, en diminuant les pertes par lixiviation des nutriments, et en optimisant l'accessibilité des racines à l'engrais. Les recommandations de NPK en microdosage sont de 4 g de NPK/poquet pour le coton et le maïs, soit l'équivalent de 125 kg/ha (UA-SAFGRAD, 2010). La dose de 4 g de biochar-SRF a été choisie sur la base du rapport pondéral 1/1 utilisé pour produire le biochar-SRF, en supposant que la totalité des nutriments du NPK dissout ont été adsorbés par le biochar, ou dans le cas contraire, le mécanisme de libération lente des nutriments pourrait compenser le contenu plus faible en nutriments du biochar-SRF pour fournir efficacement des nutriments aux cultures par rapport au NPK.

3.2.7. Conduite de l'expérimentation

Au début de chaque saison de culture, le compost a été uniformément épandu à la dose de 2,5 t/ha sur toutes les parcelles du traitement T1, suivi d'un labour à la traction bovine sur l'ensemble du dispositif expérimental. Au cours des trois saisons culturales, les semis ont été effectués entre les mois de juin et juillet, en fonction du démarrage des premières pluies. Le semis des cultures (coton et maïs) a été réalisé à 3-5 grains par poquet aux écartements de 40 cm sur la ligne et 80 cm entre les lignes. Deux semaines après le semis, les plants ont été démarriés pour ne laisser que deux plants vigoureux par poquet, soit 62500 plants/ha. Le NPK a été appliqué à la dose de 150 kg ha⁻¹ à 15 jours après le semis (JAS) et l'urée à 50 kg ha⁻¹ pour le cotonnier, et 100 kg/ha pour le maïs entre le 40^{ème} et 45^{ème} JAS pour la pratique conventionnelle (T1). Les fertilisants (NPK, biochar-SRF ou biochar enrobé) des autres traitements ont été apportés par microdose en raison de 4 g/poquet au 15 JAS, et le complément d'urée à 1 g/poquet pour le cotonnier et 2 g/poquet pour le maïs. Deux sarclages manuels ont été effectués respectivement au 14 et 35 JAS suivi d'un buttage au 40 JAS, pour lutter contre l'enherbement et réduire la compétition pour les nutriments. La protection phytosanitaire du cotonnier a été assurée par l'application des insecticides vulgarisés en culture cotonnière tous les 14 jours d'intervalle à partir du 30^{ème} jour après levée (JAL). L'*Emamectine benzoate*⁵⁰ a été utilisé au besoin pour le traitement contre les chenilles légionnaires (*Spodoptera frugiperda*) du maïs.

3.2.8. Mesure des paramètres agronomiques et échantillonnage de sol et de biomasse

Les hauteurs des plants ont été mesurées à l'aide d'un décimètre, au 30, 45 et 60^{ème} JAS pour le maïs, et 30, 60 et 80^{ème} JAS pour le cotonnier. Les rendements des cultures (grain et tiges) ont été évalués sur les récoltes effectuées manuellement sur les trois lignes centrales de chaque parcelle élémentaire. Le rendement grain du maïs a été obtenu après égrainage manuel des épis et séchage des grains à l'air libre pendant au moins trois semaines afin d'atteindre un taux d'humidité minimale de 15%. Le rendement du coton graine a été déterminé après pesage des récoltes provenant des parcelles utiles. Pour déterminer le niveau d'absorption des nutriments, des échantillons de biomasse de maïs (tiges et grains) ont été prélevés par traitement pour

déterminer leur composition en nutriments. L'échantillonnage des tiges a été fait conformément au protocole décrit par Campbell & Plank. (1998). Les échantillons ont été collectés sur six plants de maïs choisis aléatoirement dans les parcelles utiles délimitées pour les observations. Les plantes sélectionnées ont été débarrassées de leurs feuilles basales avant l'échantillonnage. Les échantillons collectés ont ensuite été soigneusement rincés à l'eau pour éliminer les traces éventuelles de particules de poussière, puis séchés au four à 85°C pendant 12 heures avant d'être broyés avec un moulin mécanique à une fraction inférieure à 2 mm. Les échantillons de grains ont été constitués à partir de l'égrenage des épis provenant des mêmes plants que les feuilles. Après l'égrenage, les grains ont été nettoyés puis broyés pour obtenir des échantillons représentatifs. Les échantillons prélevés ont été analysés pour la teneur totale en nutriments (N, P, K, Ca, Mg). Les échantillons de sol ont été prélevés avant la mise en place de l'essai en 2018 et à la fin de l'expérimentation en 2020. Avant la mise en place, des échantillons ont été collectés à la tarière sur la profondeur 0-20 cm suivant un transect en zigzag, pour établir la situation de base du sol (texture, teneur en N total, C-org et P, K, Ca et Mg totaux et biodisponibles, CEC et pH). Après deux saisons de culture, des prélèvements de sols ont été effectués dans les poquets de semis des parcelles élémentaires suivant la diagonale, pour évaluer l'effet des traitements appliqués sur les propriétés chimiques du sol.

3.2.9. Analyses physico-chimiques des échantillons

Les analyses des grains et des feuilles de maïs ont été effectuées sur des extraits obtenus à partir de la digestion d'un sous-échantillon de 2 g dans un mélange (50/50) d'acide nitrique (60%) et d'acide perchlorique (70%) pendant 16 heures. Après 16 heures de réaction, l'extrait obtenu est évaporé à la chaleur et les déchets récupérés dans de l'acide chlorhydrique (10%). Ensuite, l'azote a été quantifié par combustion sèche, le potassium a été quantifié par spectrométrie d'absorption atomique (SpectrAA 220 series, Mulgrave Victoria, Australia) et le phosphore par spectrophotométrie (UV-1205 Shimadzu, ThermoFisher Scientific, Waltham, MA USA).

La texture du sol a été déterminée uniquement pour l'étude de référence, par la méthode de la " pipette de Robinson ". Cette méthode est basée sur la vitesse de sédimentation gravimétrique dans les liquides par la méthode du tamisage par sédimentation (Robinson, 1922). Les valeurs de pH du sol ont été directement mesurées dans un rapport volumétrique de 1/5, soit dans une suspension obtenue avec l'eau distillée (pH-H₂O), soit dans du chlorure de potassium (KCl-1N) pour le pH-KCl (Pansu & Gautheyrou, 2003). La teneur en carbone organique a été déterminée par combustion sèche après élimination des carbonates avec HCl, et l'azote total a été quantifié selon la méthode Kjeldahl (Hillebrand et al., 1953). Les éléments biodisponibles du sol (P, K, Mg, Ca) ont été extraits avec de l'acétate d'ammonium (EDTA ; 0,02 M-pH=4,65) et la concentration en K, Mg et Ca dosée à l'aide du spectromètre d'absorption atomique (Lakanen & Ervio, 1971), tandis que P a été déterminé par spectrophotomètre. La capacité d'échange cationique (CEC) des sols a été déterminée par la méthode de Metson, (1956). Les données de l'analyse de la biomasse ont été utilisées pour déterminer l'efficacité d'utilisation de l'azote pour le maïs.

3.2.10. Evaluation de l'efficacité d'utilisation de l'azote

L'efficacité agronomique (AE), l'efficacité de recouvrement de l'azote (RE) et l'efficacité physiologique, ont été calculées à partir du rendement grain, des concentrations d'azote dans la biomasse végétale et dans les engrais, et ce afin d'évaluer l'efficacité d'utilisation de l'azote. L'efficacité agronomique est un indicateur qui exprime la capacité de la plante à augmenter le rendement en grain en réponse à l'application d'azote, et reflète l'efficacité globale de l'azote utilisé pour la production de matière sèche (Cassman et al., 2002).

$$AE \text{ (kg/kg)} = \frac{GYn - GY0}{Nr} \quad (3)$$

avec :

Nr est la quantité totale d'engrais N apportée (kg N ha⁻¹) ;

GYn est le rendement en grains secs obtenu avec l'application de N ;

GY0 est le rendement en grains secs sans application d'engrais N (témoin).

L'efficacité de recouvrement de l'azote (RE) ou coefficient apparent d'utilisation (CAU), est le rapport entre l'augmentation de l'absorption de l'azote par kg d'azote apporté. RE est l'indice principal pour décrire les caractéristiques de l'absorption et de l'utilisation de l'azote dans la culture, et il a été calculé en utilisant l'équation (Witt et al., 1999).

$$RE \text{ (\%)} = \left[\frac{Un - U0}{Nr} \right] * 100 \quad (4)$$

Nr est la quantité totale d'engrais N apportée (kg N ha⁻¹) ;

Un est la quantité de N absorbé à maturité par les plants des parcelles ayant reçues de l'azote (kg de N.ha⁻¹) ;

U0 est la quantité de N absorbé à maturité par les plants des parcelles non fertilisées (kg de N.ha⁻¹).

L'efficacité physiologique (PE) représente la capacité d'une plante à transformer une quantité donnée de nutriments acquis en rendement économique ou en matière sèche végétale, et a été calculée à l'aide de l'équation de Witt, (2003) :

$$PE \text{ (kg.kg}^{-1}\text{)} = \left[\frac{GYn - GY0}{Un - U0} \right] \quad (5)$$

GYn est le rendement en grains secs obtenu avec l'application de N ;

GY0 est le rendement en grains secs sans application d'engrais N (témoin) ;

Un est la quantité de N absorbé à maturité par les plants des parcelles ayant reçues de l'azote (kg de N.ha⁻¹);

U0 quantité de N absorbé à maturité par les plants des parcelles non fertilisées (kg de N.ha⁻¹).

3.2.11. Analyse des données

L'ensemble des données collectées ont été traitées avec le logiciel R (3.6.2). Les moyennes ont été comparées par des analyses de variance (ANOVA) après la vérification de la normalité, et une valeur $p < 0,05$ était le seuil pour considérer les différences significatives entre les moyennes. Le test de *Tukey* (HSD) a été utilisé pour déterminer les groupes de moyenne égale lorsque l'analyse de la variance révèle des différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5%. Le package *GraphR* et le tableur Excel ont été utilisés pour élaborer les graphiques.

3.3. Résultats

3.3.1. Composition chimique des fertilisants utilisés

Les résultats des analyses chimiques des fertilisants à libération lente (SRF) obtenus par imprégnation du biochar dans une solution de NPK (biochar-SRF) et le NPK, ont montré que la concentration totale en azote, en P et K biodisponibles des biochars-SRF était significativement plus faibles que celle du NPK. La concentration en azote du biochar-SRF et celle du phosphore et potassium, étaient respectivement de 1,5 à 2 fois de 4 fois plus faibles que celle du NPK. La teneur en Ca biodisponible était significativement plus élevée dans le biochar-SRF enrobé et le biochar-SRF comparativement au NPK, alors que celle du Mg biodisponible était statistiquement équivalente pour les trois types de fertilisants utilisés (Tableau 13).

Tableau 13 : Caractéristiques chimiques du biochar-SRF, du biochar enrobé et du NPK utilisés comme fertilisants pour l'expérimentation

Traitements	Eléments totaux (%)					Eléments biodisponibles (%)				pH-H ₂ O
	N	P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg	
Biochar-SRF	9 ^b ± 3	5,1 ^b ± 1,6	15,9 ^a ± 3,2	1,7 ^b ± 0,2	0,6 ^a ± 0,0	2,7 ^b ± 0,6	14,9 ^a ± 1,3	0,6 ^a ± 0,1	0,3 ^a ± 0,1	6,4 ^a ± 0,1
Biochar enrobé	6,8 ^c ± 2	3,8 ^c ± 1,9	14,4 ^b ± 3	2,1 ^a ± 0,8	0,5 ^b ± 0,03	2,8 ^b ± 0,1	13,2 ^b ± 1,5	0,7 ^a ± 0,2	0,2 ^b ± 0,0	6 ^b ± 0,0
NPK	13,9 ^a ± 2,4	10,9 ^a ± 1,2	15,7 ^{ab} ± 3,2	0,4 ^c ± 0,1	0,4 ^b ± 0,1	10,6 ^a ± 2,1	15,6 ^a ± 0,9	0,4 ^b ± 0,0	0,3 ^a ± 0,1	6 ^b ± 0,0

3.3.2. Dynamique libération des éléments nutritifs des biochars et du NPK

La dynamique de libération des nitrates, des phosphates et du potassium des engrais NPK et des fertilisants à base de biochar, a été étudiée par des analyses de lixiviats issus d'une expérience d'extraction séquentielle. Les profils de relargage des fertilisants utilisés ont montré une tendance à la baisse au cours du temps (Figure 23). Les masses cumulées de nitrates extraites à l'eau distillée après 504 heures d'expérimentation (3 semaines) étaient de 0,94, 23 et 48% respectivement pour le NPK, le biochar-SRF et le biochar enrobé. Contrairement aux nitrates, le cumul de phosphates et de potassium libéré sur la même période par le NPK était significativement plus élevé que celui du biochar-SRF et du biochar enrobé. Les quantités de phosphates libérés par le NPK étaient 2,4 fois plus élevés que celles libérées par le biochar-SRF et le biochar enrobé, soit respectivement 2893 contre 1324 et 1325 mg/L de phosphates (Figure 23). Tout comme les phosphates, les biochars-SRF libèrent moins de potassium (1,3 à 1,7 fois moins) que le NPK. Cette expérience révèle qu'une proportion importante des nutriments évalués ont été relargués au cours des trois à quatre premiers jours.

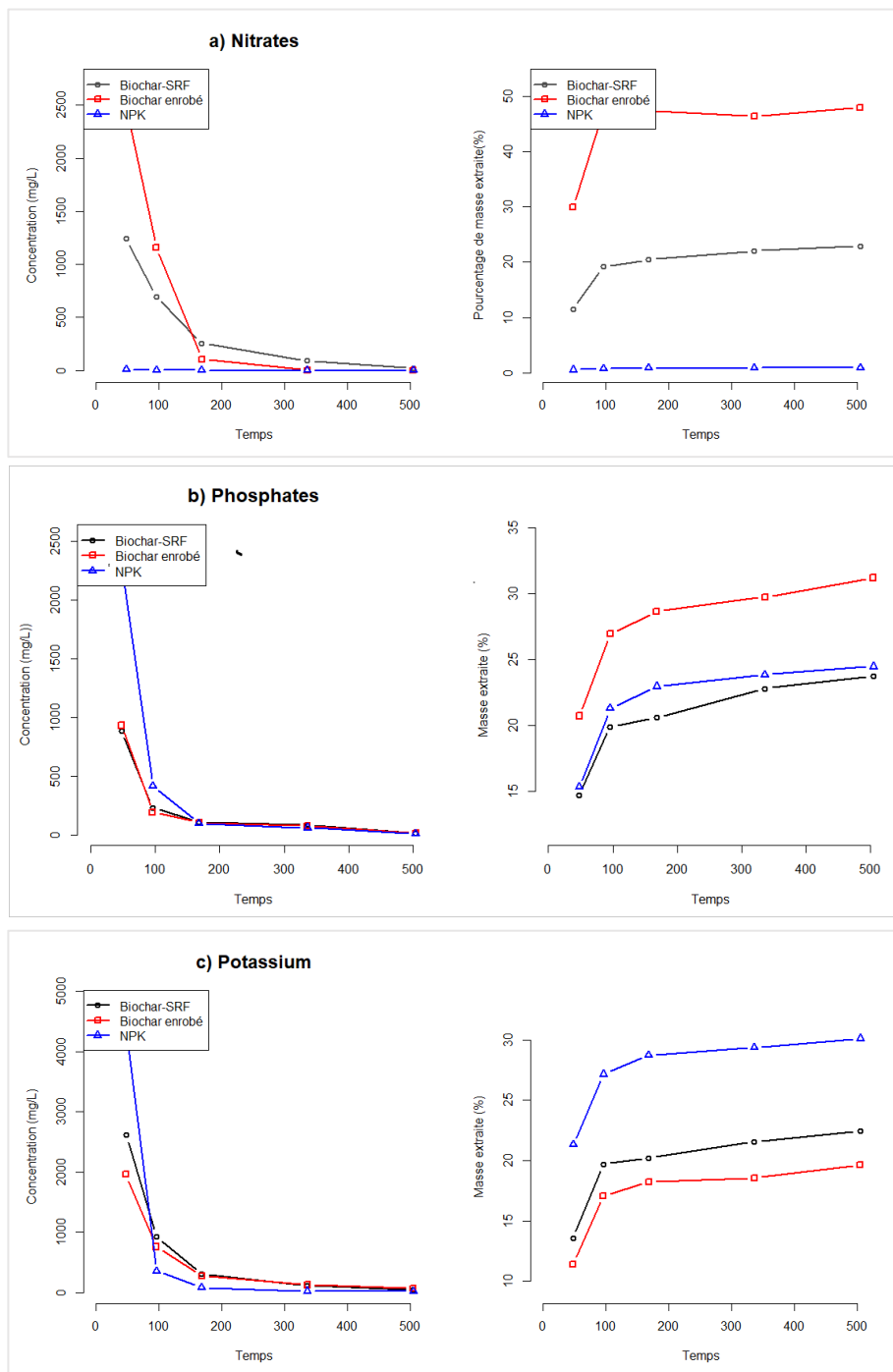


Figure 23: Dynamique de relargage des a) nitrates ; b) phosphates et c) potassium des trois fertilisants utilisés

3.3.3. Effets des engrais à base de biochar sur la croissance des cultures

Durant la campagne agricole de 2018, l'application des fertilisants n'a pas eu d'effets significatifs sur les hauteurs du cotonnier. Par contre en 2020, des variations significativement plus élevées ont été obtenues dans les parcelles amendées aux 60^{ème} et 80^{ème} JAS (Figure 24). Ainsi, à 80^{ème} JAS, la pratique conventionnelle a été plus performante que les traitements au biochar et le témoin (Tableau 14). La hauteur moyenne du cotonnier dans les parcelles sous la pratique conventionnelle (47 cm), était significativement supérieure à celle de la parcelle témoin (24 cm)). Le NPK appliqué par microdose (T2) et la pratique conventionnelle (T1), ont eu des effets statistiquement similaires sur la croissance du cotonnier au 30^{ème}, 60^{ème} et 80^{ème} JAS en 2018 et au 30^{ème} et 60^{ème} JAS en 2020. De même, les sols amendés par microdose de NPK et par les fertilisants à base de biochar, ont eu des effets statistiquement homogènes sur la croissance, indépendamment de la saison de production et du stade végétatif.

L'apport des fertilisants a eu des effets positifs sur la croissance du maïs au cours des trois stades végétatifs (Figure 24). La pratique conventionnelle a induit une augmentation de la hauteur du maïs de 17, 76 et 67% respectivement au 30, 45 et 60^{ème} JAS, comparativement au témoin sans fertilisation (Tableau 14). La croissance moyenne des plantes fertilisées au biochar était relativement plus faible que celles sous microdose de NPK, bien que les différences observées entre ces traitements ne soient pas toujours significatives. De même, aucune différence significative n'a été observée entre le biochar-SRF et le biochar enrobé.

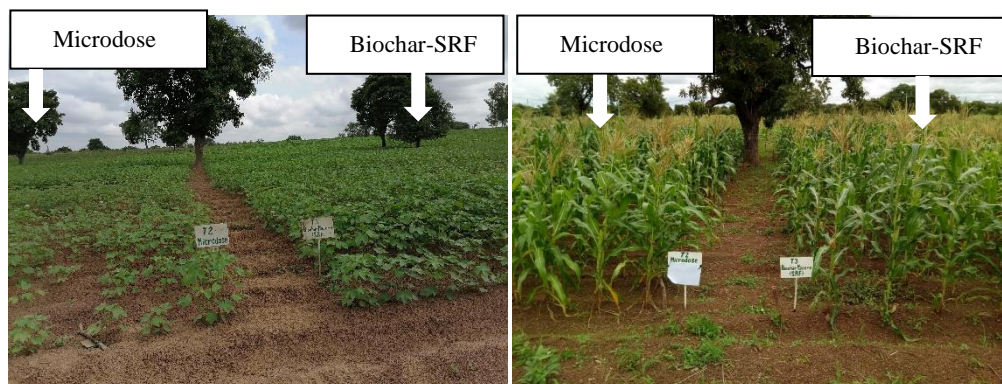


Figure 24: Parcelles de coton et de maïs amendées avec du biochar-SRF et de NPK en microdose

Tableau 14 : variation des hauteurs moyennes des plants du cotonnier et du maïs de 2018 à 2020 en fonction des traitements

Traitements	Hauteur du cotonnier 2018			Hauteur du maïs 2019			Hauteur du cotonnier 2020		
	(cm)			(cm)			(cm)		
	30 JAS	60 JAS	80 JAS	30 JAS	45 JAS	60 JAS	30 JAS	60 JAS	80 JAS
Témoin	14 ^a ± 2	21 ^a ± 5	27 ^a ± 7	41 ^c ± 7	63 ^c ± 10	79 ^b ± 13	14 ^{ab} ± 3	20 ^b ± 4	24 ^c ± 5
Pratique conventionnelle	16 ^a ± 2	30 ^a ± 7	45 ^a ± 12	48 ^a ± 11	111 ^a ± 14	132 ^a ± 15	17 ^a ± 3	33 ^a ± 9	47 ^a ± 13
Microdose	15 ^a ± 3	28 ^a ± 12	48 ^a ± 15	46 ^{ab} ± 7	105 ^a ± 15	124 ^{bc} ± 16	15 ^{ab} ± 3	25 ^{ab} ± 8	38 ^{ab} ± 13
Biochar-SRF	15 ^a ± 2	24 ^a ± 6	33 ^a ± 8	44 ^{bc} ± 7	96 ^b ± 12	110 ^{ab} ± 11	12 ^b ± 2	22 ^b ± 5	32 ^{ab} ± 7
Biochar enrobé	13 ^a ± 2	25 ^a ± 4	36 ^a ± 7	45 ^{ab} ± 7	97 ^b ± 11	113 ^{ab} ± 13	15 ^{ab} ± 3	25 ^{ab} ± 9	36 ^{ab} ± 12

Les ecartypes sont indiqués après le signe ±. Les données moyennes dans une colonne avec des lettres différentes sont significativement différentes au niveau de probabilité $p = 0,05$ selon le test *Tukey* HSD. JAS (jours après le semis)

3.3.4 Effets des engrais à base de biochar sur les rendements des cultures

Les apports de compost associé au NPK et des fertilisants à base de biochar, ont amélioré significativement les rendements du cotonnier et du maïs par rapport au témoin sans fertilisation. Durant les deux campagnes de coton (2018 et 2020), les rendements en coton graine ont été de 127 et 573 kg.ha⁻¹, et 147 et 852 kg/ha respectivement pour le témoin et la pratique conventionnelle (Figure 25). Cela correspond à des augmentations de 351 à 480% respectivement. Les résultats montrent par ailleurs que l'adjonction du compost au NPK et l'apport du NPK par microdose, ont produit des effets statistiquement homogènes sur le poids sec des tiges de cotonnier en 2018, et sur les rendements en coton graine au cours de ces deux campagnes. Par contre, la biomasse sèche des tiges de cotonnier en 2020 était plus élevée sous les parcelles traitées par microdose de NPK (1877 kg/ha), comparativement à la pratique conventionnelle (1664 kg/ha). De même, les rendements en maïs grain et le poids sec des tiges de maïs n'ont pas montré de différences significatives entre la pratique conventionnelle et le NPK appliqué par microdose, et ce, malgré un apport inférieur en éléments fertilisants (Figure 25). Cependant, en considérant uniquement les fertilisations par microdose (NPK, biochar-SRF et biochar enrobé), les rendements moyens de maïs ont significativement varié par rapport au type de fertilisant. L'apport du NPK en microdose (T2) et l'épandage du NPK associé au compost, a été plus efficace que le biochar-SRF sur le rendement tige, alors que les biochars-SRF ont produit des rendements en maïs grain plus élevés que le traitement T1. Le rendement moyen en tiges obtenu dans les parcelles sous microdose NPK, a été accru de 71% et 32% respectivement par rapport au biochar-SRF et au biochar-SRF enrobé.

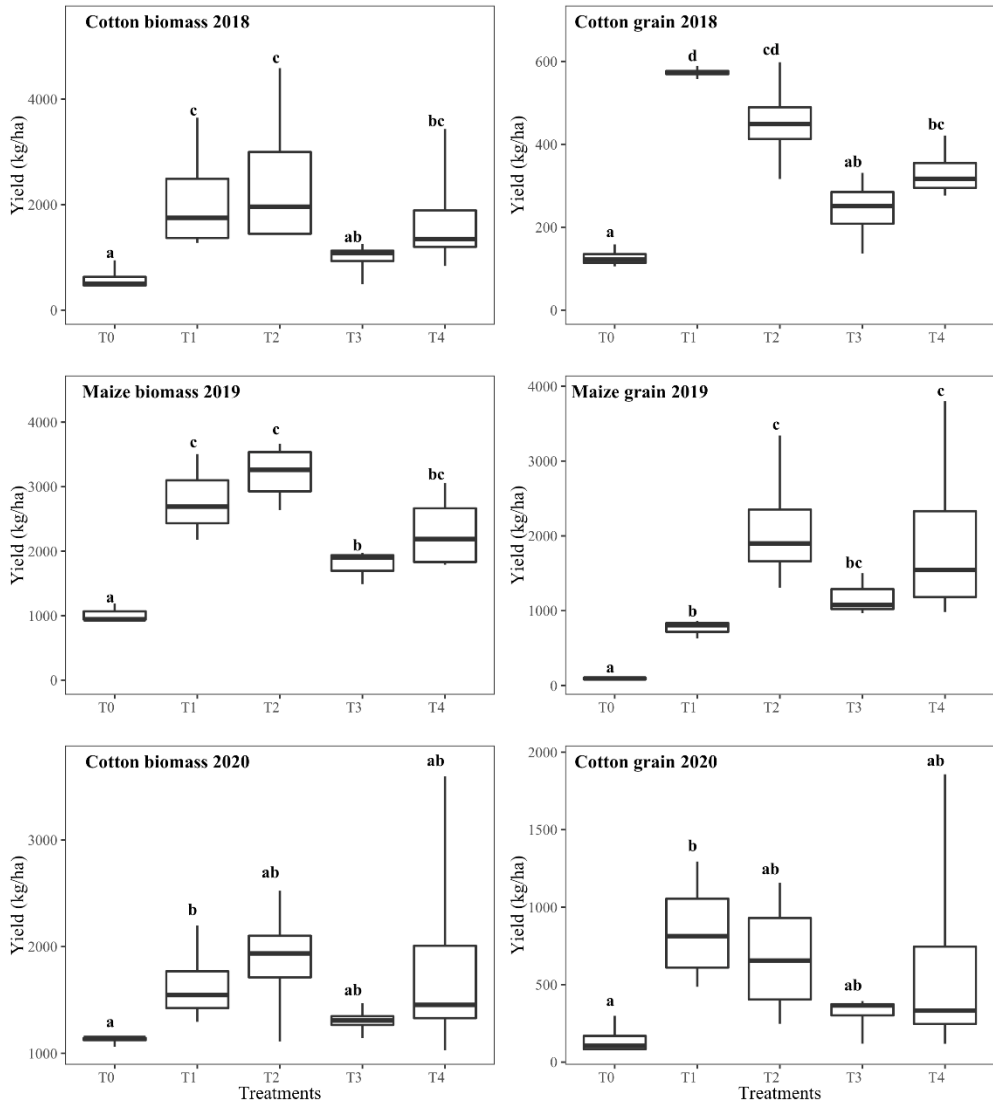


Figure 25: Biomasse sèche des tiges et rendements en coton graine et maïs grain en fonction des traitements. Légende : Treatments = traitements, T0 = Témoin ; T1 = Pratique conventionnelle ; T2 = Microdose ; T3 = Biochar-SRF ; T4 =Biochar enrobé, Yield = rendement, Cotton biomass= rendement tige, cotton grain rendement grain de coton, maïze biomass : rendement tige de maïs, maïze grain : rendement grain de maïs.

3.3.5. Effets des fertilisants sur les propriétés chimiques du sol

Les paramètres chimiques du sol ont très peu évolué après l'apport des fertilisants. Néanmoins, le carbone organique (C-org), la CEC et les éléments biodisponibles (P, K et Ca) du sol ont montré une variation très significative en réponse aux différents

fertilisants appliqués, comparativement au témoin (Tableau 15). La concentration en carbone organique est passé de 3,5 (témoin) à 5,3 g.kg⁻¹ (biochar-enrobé) et 5,5 (biochar-SRF). Pour l'ensemble des paramètres étudiés, l'application de microdose NPK (T2) et la pratique conventionnelle (T1) étaient statistiquement équivalents. De même, enrobé ou non une légère amélioration de la teneur en carbone a été observée dans les parcelles SRF simple, tandis que le P et Ca biodisponibles ont été améliorés avec l'apport du biochar-SRF enrobé. Dans le sol témoin, tout comme dans les sols amendés par différents types de fertilisants, les teneurs en azote, bien que statistiquement homogènes, ont globalement baissé à l'exception de celles des sols sous pratique conventionnelle. La teneur en N total est passée de 0,47 g/kg pour les sols témoins à 0,40 g/kg pour les biochar-SRF et enrobé, ce qui représente une baisse de 15% par rapport au témoin.

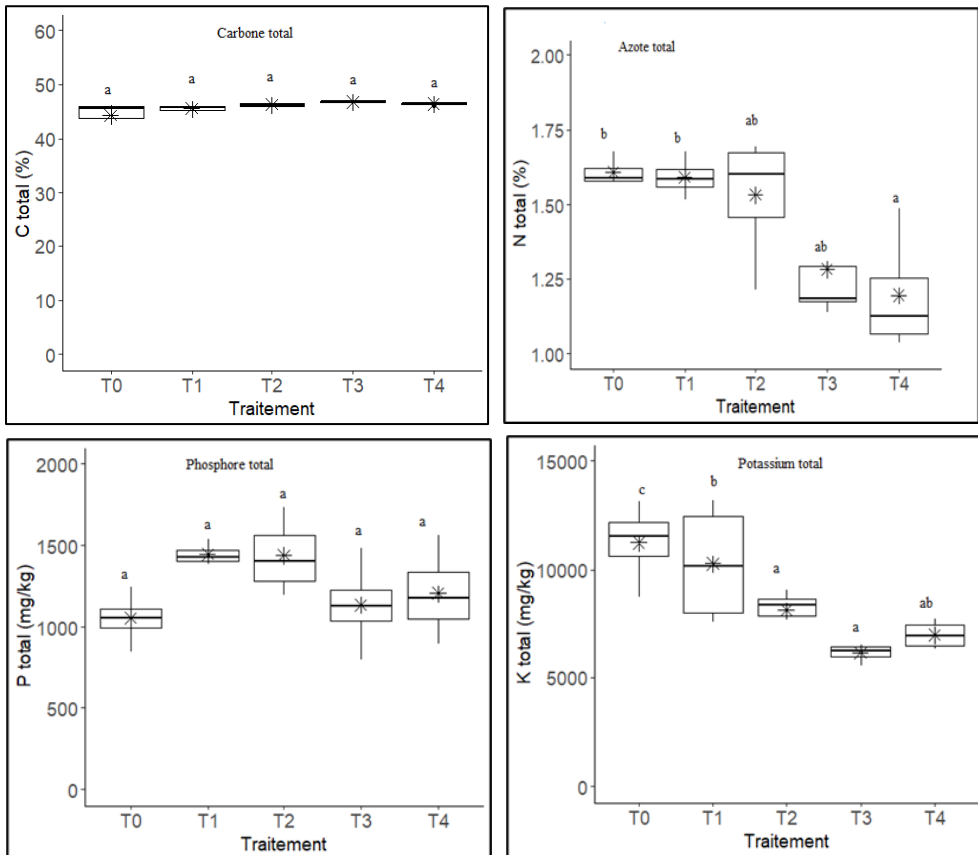
Tableau 15: Teneur en éléments nutritifs, en carbone et le pH du sol en fonction des traitements appliqués.

Traitements	pH-H ₂ O	C-org	N-total	Eléments biodisponibles				CEC (cmol.kg ⁻¹)
		(g.kg ⁻¹)	(g.kg ⁻¹)	P	K	Ca	Mg	
				(mg.kg ⁻¹)				
Témoin	5,4 ^a ± 0,2	3,5 ^b ± 0,2	0,47 ^{ab} ± 0,0	1,2 ^b ± 0,1	52 ^b ± 11	70 ^b ± 10	27 ^a ± 3	0,8 ^b ± 0,1
Pratique conventionnelle	5,2 ^a ± 0,1	4,2 ^{ab} ± 0,3	0,53 ^a ± 0,01	2 ^{ab} ± 0,1	83 ^a ± 18	81 ^{ab} ± 19	32 ^a ± 7	1,7 ^a ± 0,3
Microdose	5,5 ^a ± 0,3	4,2 ^{ab} ± 0,1	0,44 ^{ab} ± 0,0	1,8 ^{ab} ± 0,0	82 ^a ± 19	80 ^{ab} ± 16	28 ^a ± 8	1,4 ^{ab} ± 0,2
Biochar-SRF	5,5 ^a ± 0,2	5 ^a ± 0,2	0,40 ^b ± 0,0	1,4 ^b ± 1	70 ^{ab} ± 13	77 ^{ab} ± 34	30 ^a ± 6	1,3 ^{ab} ± 0,7
Biochar enrobé	5,3 ^a ± 0,2	5 ^a ± 0,2	0,40 ^b ± 0,1	3,2 ^a ± 1,6	74 ^{ab} ± 14	103 ^a ± 33	26 ^a ± 13	1 ^b ± 0,1

C-org: carbone organique; N-total: azote total; P: phosphore biodisponible; K: potassium biodisponible; Ca: calcium biodisponible; Mg: magnésium biodisponible. CEC : capacité d'échange cationique

3.3.6. Effets des fertilisants sur la nutrition minérale du maïs

Les teneurs totales en N, P, K, Ca et Mg dans les feuilles de maïs ont été significativement affectées ($p=0,0104$, $p<0,00222$ et $p<0,00365$ respectivement) par l'application des fertilisants, comparativement aux parcelles témoins sans engrais (Figure 26). Seules les teneurs en P, Ca et Mg des feuilles ont augmenté suite à l'apport des différents fertilisants. Les traitements biochar-SRF et biochar-SRF enrobé, ont amélioré la teneur en calcium des feuilles de 32 et 58% respectivement par rapport au témoin. Les teneurs en N et en K ont légèrement baissé suite à l'application de fertilisants, particulièrement sous le traitement biochar enrobé, où la teneur était inférieure à celle du témoin. La teneur en nutriments des feuilles était similaire entre la pratique conventionnelle et la microdose de NPK. Ce paramètre a connu une évolution semblable sur les parcelles amendées par microdose (T2, T3 et T4). Les autres paramètres P, Mg, Na et C n'ont pas évolué avec l'application des engrais utilisés (Figure 26).



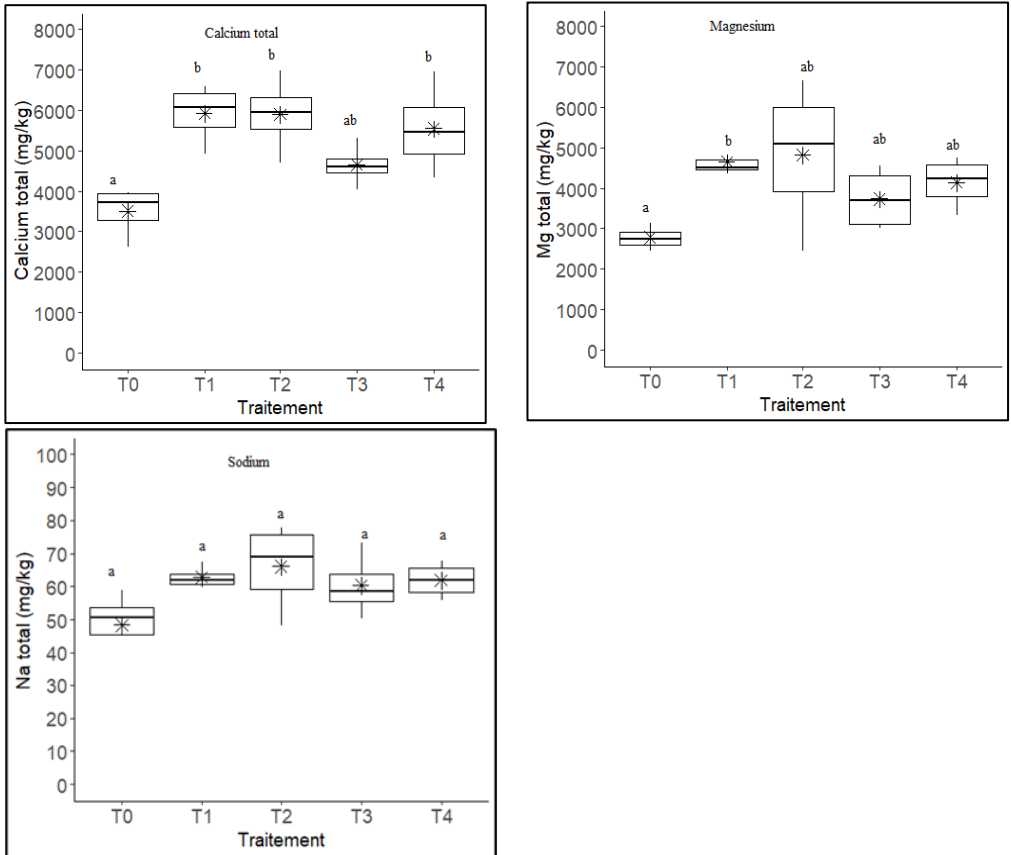


Figure 26: Teneurs totales en carbone, azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium, sodium, et des feuilles de maïs de 60 JAS ; T0 : Témoin ; T1 : Pratique conventionnelle ; T2 : Microdose ; T3 : Biochar-SRF ; T4 : Biochar enrobé

3.3.7. Evolution de l'efficacité agronomique, de recouvrement et physiologique en fonction des traitements

L'efficacité agronomique (AE) et l'efficacité de recouvrement (RE) ont significativement varié en fonction des traitements appliqués (Figure 27). Les valeurs moyennes de l'efficacité agronomique obtenue, étaient comprises entre 6 et 50 kg.kg⁻¹. Pour ces paramètres, les apports de fertilisants par microdose a donné de meilleurs résultats que l'épandage du compost associé à 150 kg de NPK/ha (T1). En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre les fertilisants appliqués par microdose pour l'efficacité d'utilisation des nutriments. Cependant, malgré l'absence de différence significative entre ces traitements, l'efficacité agronomique (AE) a augmenté de 109% lorsque le biochar-SRF est enrobé de gomme arabique (T4) par rapport au biochar-SRF non enrobé. Les mêmes tendances ont été observées pour l'efficacité physiologique.

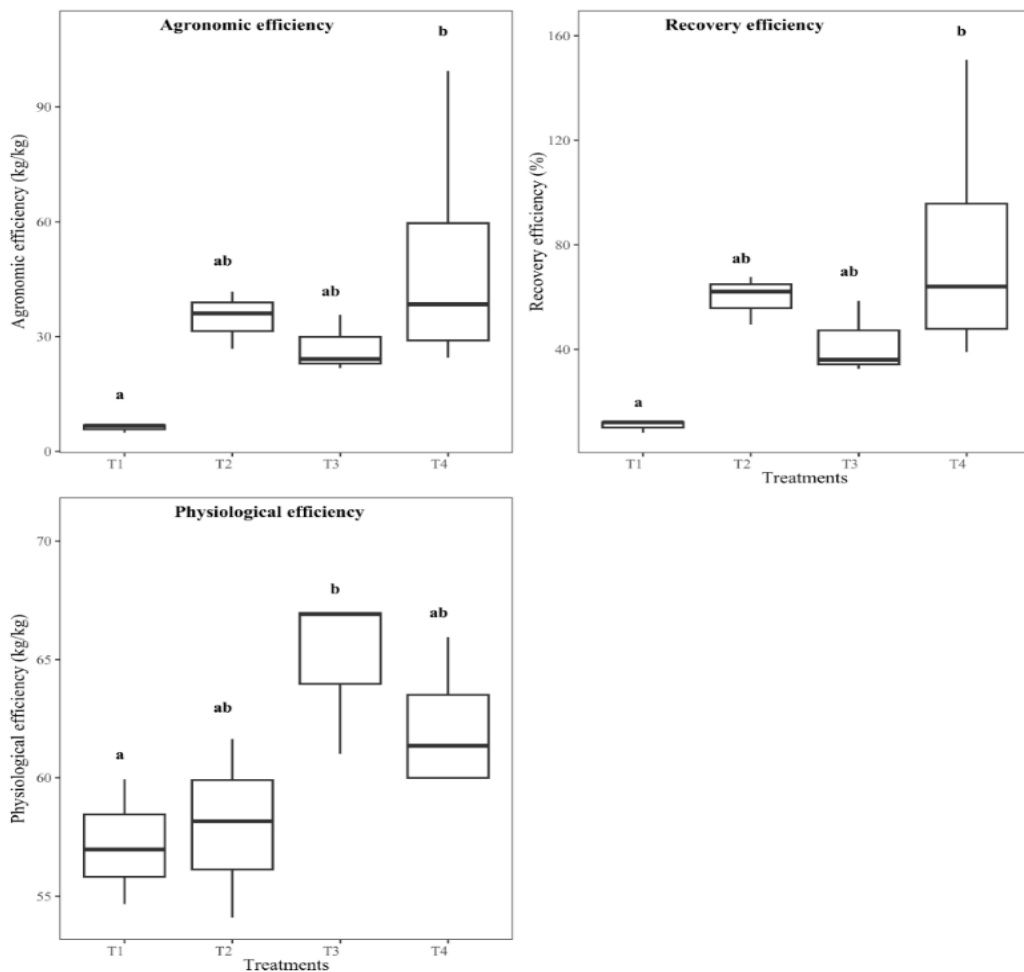


Figure 27: Variation des paramètres de l'efficacité d'utilisation de l'azote T1 : Pratique conventionnelle ; T2 : Microdose ; T3 : Biochar-SRF ; T4 : biochar enrobé.

3.4. Discussion

3.4.1. Dynamique de libération des nutriments des biochars-SRF et du NPK

Les lixiviats issus des extractions séquentielles à l'eau distillée du biochar-SRF et du biochar enrobé, étaient moins concentrés en phosphates et en potassium, comparativement à ceux provenant du NPK. De même, cette étude a mis en évidence une dissolution totale de l'azote et du potassium du NPK au cours des trois premiers jours du début de l'essai, attestant ainsi une libération rapide de ces éléments. La libération rapide des nutriments est due à la forte solubilité des fertilisants minéraux,

qui au contact de la solution se dissolvent rapidement (AlShamaileh et al., 2018; Benlamlih, 2019). Outre les pertes économiques qui en découlent, les apports des engrais hautement solubles s'avèrent fréquemment peu efficaces dans les sols tropicaux, compte tenu des pertes abondantes notamment pour les engrais phosphatés en raison de leur pouvoir fixateur souvent très élevé sur les oxydes de fer (Hinsinger et al., 2017). Ce résultat montre aussi que l'activation du biochar avec du NPK dissout, ralentit la libération des nutriments à l'exception du potassium, à un taux beaucoup plus faible que lorsqu'il s'agit de l'utilisation du NPK. Les engrais à base de biochar-SRF, ont ainsi donné non seulement un taux de libération du phosphore et de l'azote plus faibles dans l'eau distillée, mais aussi avaient un temps de libération beaucoup plus long, allant jusqu'à deux semaines pour les nitrates. Cette libération lente s'explique par une solubilisation lente des fractions adsorbées et cristallisées dans les réseaux microporeux du biochar. Il se pourrait également que les nutriments adsorbés aient bénéficiés d'une bonne protection par les coatings organiques de surface formés avec la gomme arabique. En effet, les travaux de Hagemann et al. (2017) et de Dong et al. (2019) ont montré que ces revêtements de surface contribuent à la réduction de la taille des pores, d'où une baisse de la vitesse de relargage des éléments nutritifs adsorbés. D'après Joseph et al. (2018), le faible taux de libération du biochar-SRF pourrait également être provoqué par un effet plastifiant dû à l'enrobage du biochar par un polymère, comme ce fut le cas dans la présente étude avec la gomme arabique. En effet, l'enrobage du biochar est connu pour être l'un des facteurs en plus de la réduction des pores par élévation de la température de pyrolyse, contribuant à une diminution considérable du taux de libération des nutriments et affectant le temps de relargage (Ma et al., 2016 ; Wang et al., 2022). Ces résultats suggèrent donc que, similairement aux études effectuées par Delwiche et al. (2014) dans des colonnes de sol amendées avec du biochar de pin, que la réduction remarquable de la lixiviation des substances adsorbées est due à la présence de structures microporeuses impliquées principalement dans le piégeage et l'accumulation de molécules autour des particules de biochar. Contrairement au potassium, de faibles quantités de phosphore ont été dosées dans les lixiviats. Ce résultats est en rapport avec sa faible teneur initiale par rapport au potassium, ou probablement dû à une forte rétention des phosphates dans les matrices du biochar contrairement au potassium, ou que les phosphates provenant du NPK ont été précipités par le calcium initialement présent dans le biochar pristine (Chew et al., 2020). Au cas où cela est avéré, l'apport du biochar enrichi en calcium pourrait être préjudiciable dans nos agrosystèmes, étant donné que la faible disponibilité du phosphore est due à sa complexation par les oxydes.

La quantité de nitrates (NO_3^-) désorbée des engrais à base de biochar était significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle du NPK. Cela est dû au fait que l'ammonium (non quantifié dans cette expérience) est la principale forme d'azote libérée par le NPK en phase aqueuse (Bandaogo et al., 2015). De ce fait, les nitrates libérés par le biochar proviendraient d'une conversion in-situ de l'ammonium en nitrates. Les quantités totales de NO_3^- relarguées en 96 heures par le biochar enrobé (T4), ont presque doublé celles du biochar-SRF (T3). Cela montre que les revêtements formés par l'enrobage avec la gomme arabique était insuffisant pour créer l'effet "écran" permettant de diminuer les taux de relargage (Rashidzadeh et al., 2015). Le relargage massif observé dans la présente étude, n'est pas conforme avec la plupart

des travaux antérieurs qui s'accordent sur l'impact positif de l'enrobage des engrais sur la réduction de diffusion des nutriments et l'amélioration des propriétés de libération lente du biochar (Wang et al., 2022). D'où la nécessité de pousser les investigations pour élucider le mécanisme responsable de comportement inattendu enregistré dans la présente étude. En effet, Gwenzi et al. (2018), ont observé une réduction du taux de libération des nitrates après l'enrobage du biochar avec du manioc, et les résultats ont été attribués à l'effet colmatant de l'amidon. Ito et al., (2003) ont lié la tendance observée à la minceur de la couche d'enrobage. Pour ces auteurs, la formation de revêtements trop mince durant l'enrobage pourrait accentuer le relargage des nutriments, par optimisation de l'humidité interne dans le biochar si toutefois l'effet plastifiant favorable à la réduction de vitesse du relargage n'est pas acquis. Néanmoins, nos travaux ont montré que le biochar permet de réduire la mobilité des nitrates, et de fait, il pourrait être un outil prometteur pour minimiser leur perte dans le sol tout en améliorant son efficacité d'utilisation. Cependant, il est également recommandé d'évaluer la dégradabilité des types de revêtements organiques et les effets secondaires sur l'agrégation du sol et les processus microbiens, avant une application à grande échelle (Wang et al., 2022).

3.4.2 Effets de l'apport du biochar sur les paramètres du sol

Les caractéristiques initiales du sol ont révélé une acidité prononcée et sa pauvreté en nutriments essentiels. Sa teneur en N total et en P et K biodisponibles sont en dessous des normes requises pour la production végétale dans la région ouest du Burkina Faso. Ces caractéristiques reflètent le degré élevé d'altération de ce sol à l'image de la majorité des sols du Burkina Faso (Félix et al., 2018). Malgré cette forte dégradation, l'apport des amendements a induit une évolution positive de certains paramètres notamment le C-org, la CEC, P, K et Ca. La teneur en carbone était plus élevée avec les traitements à base de biochar, en raison de leur forte proportion en carbone (Joseph et al., 2010). Par contre, la teneur en N et en K biodisponible était plus élevée dans les sols amendés avec la pratique conventionnelle, comparativement à l'apport des engrais à base de biochar et la microdose de NPK. Cette capacité de la pratique conventionnelle à améliorer les paramètres du sol à court terme, peut être attribuée à l'effet positif de l'adjonction de compost à l'engrais minéral dans le sol (Bonzi et al., 2008). En effet, l'incorporation du compost au sol (2,5 t/ha/an) contribue rapidement à l'amélioration des caractéristiques du sol, soit en suppléant le stock nutritif par minéralisation rapide sous climat tropical chaud, ou en améliorant la rétention (sur le complexe argilo-humique) des éléments nutritifs provenant du NPK, ce qui permet de limiter les pertes et d'améliorer le reliquat nutritif (Koulibaly et al., 2009; Ouédraogo et al., 2020). Une légère amélioration du P a été obtenue avec les engrais à base de biochars, en particulier avec le biochar enrobé, probablement en raison du maintien d'un fort reliquat de nutriments dans les systèmes racinaires grâce à la libération lente qui permet de conserver les reliquats nutritifs sur une longue période (Wang et al., 2022). Ceci combiné au taux de libération plus lent du P observé dans l'expérience d'extraction séquentielle, pourraient soutenir les effets bénéfiques de l'enrobage pour produire un engrais phosphaté à libération lente à base de biochar (Rombel et al., 2022).

3.4.3. Relation entre les propriétés du sol, le rendement des cultures et l'efficacité d'utilisation des nutriments

Les résultats des trois campagnes d'expérimentation, ont montré que les rendements en coton graine obtenus étaient globalement faibles par rapport à ceux couramment enregistrés dans la région (Koulibaly et al., 2015). Ces faibles rendements pourraient s'expliquer par le niveau de fertilité initial extrêmement bas dans les sols de la station expérimentale de Farako-Bâ (Cattan, 1992), mais aussi par les semis tardifs enregistrés surtout à la première campagne. En effet, les semis tardifs exposent le cotonnier aux phénomènes climatiques extrêmes (chaleur, pluies tardives) préjudiciables au bon développement et au maintien des organes fructifères du cotonnier facteur de productivité (Sekloka et al., 2016; Amonmidé et al., 2021). Les saisons de production durant l'expérimentation ont été marquées par de mauvaises répartitions pluviométriques, bien que les cumuls de pluie reçus soient efficaces pour couvrir les besoins du cotonnier. En effet, plusieurs poches de sécheresse et des pluies tardives en fin du cycle ont été enregistrées durant les phases critiques du cycle du cotonnier en début de croissance, à la floraison et fructification du cotonnier en 2018 et en 2020, de même qu'en 2019 au stade de la floraison du maïs. Il est possible que cette situation soit aggravée par l'insuffisance d'eau pour induire la solubilisation des nutriments cristallisés dans le biochar, du fait des nombreuses épisodes de sécheresse survenus au cours des campagnes agricoles. Il a été montré que la libération lente à partir des réseaux microporeux du biochar, varie en fonction de l'évolution de l'état d'humidité du sol et de l'action des micro-organismes. Pourtant, les plantes de cotonnier ont besoin constamment de macronutriments en plus grande quantité pour une croissance et un développement optimal traduit par un rendement en coton-graine plus élevé et une meilleure qualité de fibre (Manzoor et al., 2022). Dans la pratique courante de fertilisation, le supplément indispensable conditionnant le rendement du cotonnier est apporté sous forme de réserve potassique en dose fractionnée (Koulibaly et al., 2016). Ces faibles apports nutritifs se sont traduits par des résultats qui contrastent avec ceux couramment rencontrés dans la littérature. En dehors des carences du sol, les saisons de production ont été marquées par de mauvaises répartitions pluviométriques, malgré un cumul annuel de pluie satisfaisant. Plusieurs poches de sécheresse et des pluies tardives en fin du cycle ont été enregistrées durant les phases critiques du cycle du cotonnier en début de croissance, à la floraison et à la fructification du cotonnier en 2018 et en 2020, de même qu'en 2019 au stade de la floraison du maïs. Ces perturbations ont négativement impacté la réponse des cultures aux amendements apportés. Les pluies tardives accentuent la pourriture des capsules, ce qui conduit à une baisse importante de rendement (Sekloka et al., 2016). Néanmoins, on peut retenir que l'apport des amendements a eu des effets positifs et significatifs sur les rendements par rapport au témoin non fertilisé, démontrant le rôle important de la fertilisation à rehausser les rendements agricoles sur des sols tropicaux dégradés. La pratique conventionnelle (épandage de NPK et de compost) et la microdose de NPK ont été plus efficaces en production de coton graine au cours des deux saisons, par rapport à l'application par microdose des biochars-SRF. Cette faible performance du biochar en culture de coton, serait probablement liée à une insuffisance de nutriments pour couvrir les besoins du cotonnier, du fait que les

biochars-SRF soient initialement moins pourvus en éléments essentiels N, P et K que le NPK. Il se pourrait également que la libération lente des nutriments des biochars-SRF dans la solution du sol, ait été défavorable à une nutrition minérale convenable du cotonnier pendant les phases de grands besoins comme la floraison et la fructification, et que cela soit aggravé par des apports de quantités insuffisantes (microdose) dans des sols extrêmement pauvres. Ces faibles apports nutritifs se sont traduits par des résultats qui contrastent avec ceux couramment rencontrés dans la littérature (Chew et al., 2020; Manzoor et al., 2022; Pandit et al., 2020). Ces auteurs ont obtenu des augmentations significatives des rendements par rapport à la pratique conventionnelle, suite à l'application du biochar co-composté ou activé par imprégnation dans une solution nutritive attribué à une bonne disponibilité des nutriments pour la culture.

Par ailleurs, nos travaux ont confirmé que la réponse à l'application du biochar-SRF s'est traduite par des améliorations de la croissance végétative et du rendement du maïs en 2019. Contrairement au rendement en coton graine, le rendement grain du maïs ont augmenté avec l'application du NPK en microdose (T2) et le biochar enrobé (T4), par rapport à la pratique conventionnelle. Cela dénote que l'application en microdose des engrais semble être un moyen viable permettant d'augmenter l'efficacité de l'utilisation des nutriments, surtout en production du maïs (Tsujimoto et al., 2021). La bonne performance obtenue avec le biochar enrobé par rapport au NPK en microdose, pourrait s'expliquer par une disponibilité suffisante de nutriments grâce de la libération lente (Gwenzi et al., 2018; Manzoor et al., 2022), ce qui a permis une bonne synchronisation des besoins des plantes et et probablement aussi un développement rapide des racines. De plus, la limitation des pertes de nutriments due au mécanisme de relargage lent, semble être importante dans la production de maïs où 90% des besoins en nutriments sont utilisés au-delà de 45 JAS (Cui, 2007). Dans ce cas spécifique, l'utilisation des fertilisants à base de biochar-SRF semble être plus bénéfique pour conserver les nutriments disponibles dans les sols pendant une période plus longue.

En outre, ces résultats mettent en exergue les effets bénéfiques de la microdose à améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments par les plantes. Cela s'est traduit par des valeurs plus élevées de l'efficacité agronomique et de recouvrement, ouvrant des perspectives d'économie d'engrais sur les doses actuellement vulgarisée, et donc de réduire des charges liées à leur achat et l'amélioration du retour sur investissement (Ibrahim et al., 2016 ; Saba et al., 2017). De même, l'apport du biochar enrobé a montré un meilleur potentiel d'augmentation du rendement grain du maïs que le biochar-SRF non enrobé, contrairement au rendement du coton, ce qui signifierait que l'efficacité du SRF dépend non seulement des paramètres du sol, mais aussi du type de spéculatation comme l'avait démontré Joseph et al. (2021). Cette augmentation des rendements sous traitements biochars-SRF, montre sa capacité à fournir des nutriments au maïs sur une plus longue période de son cycle, et de fait, pourrait entraîner une plus grande efficacité agronomique, même si le SRF fournit moins de nutriments que le NPK en microdose.

3.5. Conclusion partielle

La baisse de la fertilité des sols et la faible efficacité des apports d'engrais constituent les principales causes du faible rendement des cultures et de l'insécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne. Cette étude a évalué une nouvelle approche de fertilisation basée sur le biochar utilisé comme engrais SRF en microdose, afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments pour le maïs et le cotonnier au Burkina Faso. Ces travaux ont montré que l'utilisation de biochar enrobé de gomme d'*Acacia* et enrichi de NPK, est un moyen prometteur pour améliorer le rendement du maïs et les paramètres chimiques des sols pauvres en nutriments. L'apport d'une faible quantité de biochar dans les poquets de semis, améliore l'efficacité d'utilisation de l'azote avec des effets positifs sur l'efficacité agronomique. Les biochars-SRF utilisés ont significativement augmenté les rendements et l'efficacité d'utilisation des nutriments du maïs. La libération lente de N, P et K des engrais à base de biochar, peut être considérée comme un avantage pour améliorer la capacité de rétention des nutriments dans les sols tropicaux, caractérisés par des taux élevés de lessivage des nutriments. Le processus d'activation devrait cependant être optimisé afin d'accroître le taux de rétention des nutriments issus du NPK dissout, y compris avec enrobage avec la gomme d'*Acacia* pour maximiser les avantages agronomiques. Cette étude révèle que l'application par microdose d'engrais à base de biochar-SRF, est une pratique d'optimisation de l'utilisation de l'azote dans les systèmes culture à base de maïs. Les avantages de cette technique de fertilisation innovante sont comparables à ceux de l'application de NPK associés au compost selon la pratique recommandée. De ce fait, la fertilité des sols dans les agrosystèmes cotonniers pourrait être améliorée par le recyclage des tiges de cotonnier en biochar enrichi en nutriments, et enrobé ou non. Compte tenu de ces résultats prometteurs, des investigations sont nécessaires pour examiner les effets à long terme de ce fertilisant SRF sur la productivité des cultures et sa rentabilité économique pour les petits agriculteurs.

3.6. 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>
- Amonmidé, I., Bienvenu, P., Akponikpè, I., & Dagbénonbakin, G. D. (2021). Réponse du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) à la fertilisation minérale dans diverses zones agro-écologiques : revue quantitative. 25(2), 89–108.
- Bado, B. V. (2002). Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéens et soudanienne du Burkina Faso. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.). 167.
- Bandaogo, A., Bidjokazo, F., Youl, S., Safo, E., Abaidoo, R., & Andrews, O. (2015). Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102(1), 79–89. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9653-6>
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., & Kimetu, J. (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems.

- Agricultural Systems, 94(1), 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.08.011>
- Biielders, C. L., & Gérard, B. (2015). Field Crops Research Millet response to microdose fertilization in south – western Niger : Effect of antecedent fertility management and environmental factors. *Field Crops Research*, 171, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.008>
- Bonzi, M., Lompo, F., Kiba, D. I., & Sédogo, P. M. (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. In A. Bationo, R. Tabo, B. Waswa, J. Okejo, J. Kihara, M. Fosu, & S. Kabore (Eds.), *Synthesis of soil, water and nutrient management research in the Volta Basin* (pp. 83–98).
- BUNASOLS. (1990). Manuel pour l'évaluation des terres. Documentations techniques n°6, Ouagadougou.
- Cassman, K. G., Dobermann, A., & Walter, D. T. (2002). Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *Ambio*, 31(2), 132–140. <http://www.ambio.kva.se>
- Cattan, P. (1992). Efficacité de la fertilisation phosphatée de l'arachide et du sorgho au Burkina Faso et utilisation des phosphates locaux. *Oléagineux*, 47(4), 171–179.
- Chew, J., Zhu, L., Nielsen, S., Graber, E., Mitchell, D. R. G., Horvat, J., Mohammed, M., Liu, M., van Zwieten, L., Donne, S., Munroe, P., Taherymoosavi, S., Pace, B., Rawal, A., Hook, J., Marjo, C., Thomas, D. S., Pan, G., Li, L., Fan, X. (2020). Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice. *Science of the Total Environment*, 713 (November 2019), 136431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136431>
- Cisse, D. (2022). Effets des amendements à base de biochar sur les paramètres agro-pédologiques dans une rotation coton-maïs à l'ouest du Burkina Faso. Thèse de doctorat Uliege/Univ Nazi Boni. 156p.
- Cissé, D., Cornelis, J. T., Traoré, M., Saba, F., Coulibaly, K., Lefebvre, D., Colinet, G., & Nacro, H. B. (2021). Co-composted biochar to decrease fertilization rates in cotton–maize rotation in Burkina Faso. *Agronomy Journal*, 113(6), 5516–5526. <https://doi.org/10.1002/agj2.20867>
- Clare, A., Shackley, S., Joseph, S., Hammond, J., Pan, G., & Bloom, A. (2015). Competing uses for China's straw: The economic and carbon abatement potential of biochar. *GCB Bioenergy*, 7(6), 1272–1282. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12220>
- CNS, (2014). Catalogue national des espèces et variétés agricoles du Burkina Faso. Document de vulgarisation. 81p
- Dong, D., Wang, C., Van Zwieten, L., Wang, H., Jiang, P., Zhou, M., & Wu, W. (2019). An effective biochar-based slow-release fertilizer for reducing nitrogen loss in paddy fields. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02401-8>
- Félix, G. F., Clermont-Dauphin, C., Hien, E., Groot, J. C. J., Penche, A., Barthès, B. G., Manlay, R. J., Tiftonell, P., & Cournac, L. (2018). Ramial wood amendments (*Piliostigma reticulatum*) mitigate degradation of tropical soils but do not replenish nutrient exports. *Land Degradation and Development*, 29(8), 2694–

2706. <https://doi.org/10.1002/ldr.3033>
- Gao, Y., Shao, G., Lu, J., Zhang, K., Wu, S., & Wang, Z. (2020). Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 249(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107763>
- 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>
- Hagemann, N., Subdiaga, E., Orsetti, S., de la Rosa, J. M., Knicker, H., Schmidt, H. P., Kappler, A., & Behrens, S. (2018). Effect of biochar amendment on compost organic matter composition following aerobic composting of manure. *Science of the Total Environment*, 613–614, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.161>
- Hillebrand, W. F., Lundell, G. E. ., Bright, H. ., & Hoffman, J. I. (1953). *Applied inorganic analysis*,. John Wiled(2 nd ed.), 1034p.
- Ito, R., Golman, B., & Shinohara, K. (2003). Controlled release with coating layer of permeable particles. *Journal of Controlled Release*, 92, 361–36.
- 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,”* 144(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Joseph, S., Kammann, C. I., Shepherd, J. G., Conte, P., Schmidt, H. P., Hagemann, N., Rich, A. M., Marjo, C. E., Allen, J., Munroe, P., Mitchell, D. R. G., Donne, S., Spokas, K., & Graber, E. R. (2018). Microstructural and associated chemical changes during the composting of a high temperature biochar: Mechanisms for nitrate, phosphate and other nutrient retention and release. *Science of the Total Environment*, 618(October), 1210–1223. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.200>
- Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). *Life Cycle Assessment of Biochar Systems : Estimating the Energetic , Economic , and Climate Change Potential.* 827–833.
- Kizito, S., Luo, H., Lu, J., Bah, H., Dong, R., & Wu, S. (2019). Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: Exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer

- demand. Sustainability (Switzerland), 11(11).
<https://doi.org/10.3390/su11113211>
- Koulibaly, B., Traoré, O., Dakuo, D., & Zombré, P. N. (2009). Effets des amendements locaux sur les rendements, les indices de nutrition et les bilans culturaux dans un système de rotation coton-maïs dans l'ouest du Burkina Faso. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 13(1), 103–111.
- Lakanen, E., & Ervio, R. (1971). A Comparison of Eight Extractants for the Determination of Plant Available Micronutrients in Soils. *Acta Agralia Fennica*, 123, 223-232.
- Lehmann J. & Stephen J., (2009). Biochar for Environmental Management : An Introduction, in: Lehmann, Johannes, Joseph, Stephen (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Earthscan, London and Sterling, VA, pp. 1-12.
- Levesque, V. (2017). Amendement en biochars : Effets sur l'activité et la structure des microorganismes et sur les rendements de la tomate et du poivron de serre. 232. <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/15697>
- Lompo, F., Bonzi, M., Bado, B. V., Gnankambary, Z., Ouandaogo, N., Sedogo, M. P., & Assa, A. (2008). Organo-Minerales Sur La Dynamique Du Phosphore. *Agronomie Africaine*, 20(2), 165–178.
- Metson, A. J. (1956). Methods of chemical analysis for soil survey samples. *New Zealan Soil. Bureau Bulletin N° 12*.
- Ouédraogo, R. A., Chartin, C., Kambiré, F. C., van Wesemael, B., Delvaux, B., Milogo, H., & Biélders, C. L. (2020). Short and long-term impact of urban gardening on soil organic carbon fractions in Lixisols (Burkina Faso). *Geoderma*, 362(October 2019), 114110. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114110>
- Ouedraogo, Y., Taonda, J. S., Idriss, S., Tychon, B., & Biélders, C. L. (2020). Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-Saharan Africa : A meta-analysis. July 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1002/agj2.20229>
- Pallo, F. J. . (1996). Etudes pédologiques des stations de recherche de Niangoloko (80 ha) et de Farakoba (150 ha). Echelle 1/10000e.
- 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., & Gautheryou, J. (2003). L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. IRD Éditio.
- Robineau, O., & Dugué, P. (2018). A socio-geographical approach to the diversity of urban agriculture in a West African city. *Landscape and Urban Planning*, 170(September 2017), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.010>
- Robinson G. W. (1922). A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *J. Agric. Sci.*, 12., 287–291.
- Rombel, A., Krasucka, P., & Oleszczuk, P. (2022). Sustainable biochar-based soil

- fertilizers and amendments as a new trend in biochar research. *Science of the Total Environment*, 816, 151588. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151588>
- Sanogo, M., Gaspart, F., Kabore, D., & Taonda, S. J. (2020). The determinants of fertilizer microdosing adoption and impact on sorghum and maize yields in Burkina Faso. *11(6)*, 114–122. <https://doi.org/10.7176/JESD/11-6-13>
- 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>
- Schmidt, H. P., Pandit, B. H., Martinsen, V., Cornelissen, G., Conte, P., Kammann, C. I., & Nutrition, P. (2015). Article Tripling of pumpkin yield by low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar in a fertile tropical soil. 1–23. <https://doi.org/10.3390/agriculture50x000x>
- Sekloka, E., Lançon, J., Zinsou, V. A., & Thomas, G. (2016). Influence des conditions de culture sur la production de capsules chez le cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) en conditions de culture pluviale au Bénin. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 20(2), 161–170.
- 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>
- Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167>
- Witt, C. (2003). Fertilizer use efficiencies in irrigated rice in Asia. 2003 IFA Regional Conference for Asia and the Pacific, 6-8 October, Cheju Island, Republic of Korea, 16 p.
- Witt, C., Dobermann, A., Abdulrachman, S., Gines, H. C., Wang, Guanghuo, Nagarajan, R., Satawatananont, S., Tran Thuc, S., Sy, P. T., Tiem., L. Van, G.C., S., & D.C., O. (1999). Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Research*, 63(2), 113–138.
- WRB-IUSS. (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In *World Soil Resources Reports No. 106*. <https://doi.org/10.1017/S0014479706394902>
- 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. *Tropicicultura*, 31(4), 224–230.

Chapitre 4

Gestion efficace des nutriments par l'utilisation de fertilisants à libération lente à base de biochar (*slow release fertilizer- SRF*) dans un système *zai* au Centre-Nord du Burkina Faso

Fatimata SABA, Hamado SAWADOGO, Jean-Thomas CORNELIS, Abdou-Kadre OUEDRAOGO, Drissa CISSE, Kalifa COULIBALY, Hassan Bismarck NACRO. 2022. Gestion efficace des nutriments par l'utilisation du slow release fertilizer (SRF) dans un système *zai* au Centre-Nord du Burkina Faso. *Agronomie Africaine* vol.34 (1)

Chapitre 4. Gestion efficace des nutriments par l'utilisation de fertilisants à libération lente à base de biochar (*slow release fertilizer-SRF*) dans un système *zai* au Centre-nord du Burkina Faso

Résumé

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 baisse à cause de la faible accessibilité aux amendements de qualité nécessaires pour booster la performance de la technique, et à cause de la baisse des précipitations. Il apparaît nécessaire de tester avec les producteurs, de nouvelles options d'amendements plus accessibles, et permettant de mieux gérer l'eau et les nutriments du sol. Pour y parvenir, il a été mis en place au Centre-Nord du Burkina Faso, un dispositif expérimental en blocs randomisés comportant six traitements, T0= 100 g de compost/poquet (pratique paysanne) ; T1= 100 g de biochar pristine/poquet + 2 g NPK et 1 g d'urée ; T2= 2 g de NPK et 1 g d'urée/poquet ; T3= 2 g de biochar- SRF125 et 1g d'urée/poquet ; T4 = 2 g de pristine/poquet + 2 g de NPK et 1 g d'urée/poquet et T5= 100 g de compost/poquet + 100 kg/ha de NPK et 50 kg/ha d'urée (Dose vulgarisée). L'étude visait à évaluer l'efficacité du biochar-SRF obtenu à partir du biochar de tiges de cotonnier enrichi en nutriments avec une solution du NPK, sur les paramètres agronomiques du sorgho et sur les propriétés du sol. Après deux années d'expérimentation, les analyses chimiques effectuées sur les échantillons de sol montrent que les fertilisants ont amélioré les paramètres du sol (N, P, K et C) de 2 à 285%. Les rendements grain du sorgho ont augmenté de 10 à 85% avec le biochar-SRF. Par conséquent, le biochar-SRF peut être vulgarisé comme une alternative durable, et valablement remplacer la fertilisation minérale recommandée.

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

4.1. Introduction

Dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, la dégradation des sols et les sécheresses récurrentes constituent les principaux facteurs limitants de la production agricole. Dans la région du Centre-Nord du Burkina Faso, les conditions pédologiques et climatiques défavorables ont conduit à des sols fortement dégradés avec de très faibles réserves nutritives et en eaux, les rendant difficiles à l'activité agricole ; 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 sols dénudés appelées clairières ou *zipella* en langue locale mooré (Yaméogo et al., 2013). Dans ce contexte, la gestion des sols et des eaux devient un élément essentiel pour assurer les productions agricoles, et partant, la sécurité alimentaire.

L'une des techniques anciennes de restauration de la fertilité de ces sols, est l'application de la matière organique notamment du fumier, du compost ou la combinaison des deux dans le *zai*. Le *zai* est une forme particulière de culture en

poquets concentrant les eaux de ruissellement et les matières organiques dans de micro-bassins de sols encroûtés et fortement dégradés (Roose et al., 1993). Récemment, il a été montré que les rendements des cultures sous *zai* sont en baisse à cause de la faible disponibilité de la matière organique de qualité, et la baisse et la mauvaise répartition des précipitations (Bayen et al., 2011; Troy & Picaud, 2013). De plus, les travaux de recherche de Barro et al. (2007) ont montré que la forte demande en main d'œuvre du *zai* (300 hommes/ha), constitue une contrainte majeure à sa pratique. Dans le souci de trouver des solutions durables pour rehausser la performance du *zai*, nous avons testé l'efficacité de l'utilisation du biochar issu du recyclage de résidus culturels aux amendements organiques classiques (compost, fumier) dans un système *zai*. Le biochar est un constituant organique poreux hautement résistant à la dégradation, car issu de la pyrolyse de la biomasse sous apport limité ou en absence 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 une contrainte majeure. 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, les effets bénéfiques de l'apport du biochar au sol est liée à sa grande porosité ainsi qu'à son potentiel de rétention des nutriments (Verheijen et al., 2019 ; Razzaghi et al., 2020).

Afin de rendre le biochar accessible à la majorité des petits producteurs en vulgarisant des doses modestes, certains auteurs (Hagemann et al., 2017; Schmidt et al., 2017) proposent de l'activer en associant à une source de nutriments (urine, compost, engrais minéraux) en vue d'améliorer sa valeur nutritive et accroître son efficacité à faible dose. Dans le contexte Burkinabè, l'introduction du biochar produit à partir de biomasses localement disponibles et très peu valorisées (tiges de cotonnier, balles de riz, rachis de maïs, gousses de *Piliostigma*), représente à la fois une opportunité et un risque, si l'on considère que la biomasse est une ressource renouvelable mais limitée de par la diversité d'usage fait de ces ressources (énergie, alimentation de bétail, construction, etc.). De ce fait, la promotion de faibles doses de biochar à haute valeur nutritive est un impératif pour prendre en compte les petits producteurs, qui risquent d'éprouver des difficultés pour produire des quantités suffisamment élevées de biochar. L'activation du biochar qui consiste à l'enrichir par d'autres substances à fortes teneurs nutritives (compost, engrais minéraux, urine, etc.), permet d'améliorer l'efficacité agronomique du biochar même à faible dose. L'activation permet de produire des fertilisants à libération lente ou *Slow Release Fertilizer* en anglais, comme alternative aux engrais minéraux classiques (NPK, urée, DAP, ...) en utilisant le biochar comme support des nutriments (biochar-SRF). À la différence des engrais solubles, le mécanisme de libération lente permet de réguler la mobilité des éléments nutritifs dans le sol. Ainsi, le biochar-SRF libère graduellement

les éléments nutritifs dans la solution du sol en fonction de leur concentration dans le sol et de la demande de la plante, ce qui permet de réduire les pertes et de satisfaire les besoins des plantes sur une longue période, d'où une amélioration de la productivité des sols et des rendements des cultures (Alshamaileh et al., 2018 ; Gwenzi et al., 2018). En plus, contrairement au compost soumis à une minéralisation rapide dans les sols due aux conditions du climat tropical, le biochar est majoritairement constitué de carbone récalcitrant à la dégradation. Cela lui confère une durée d'action plus longue dans le sol. Cette propriété pourrait être utile dans le système *zai*, en permettant de différer le rafraîchissement/creusage annuel des trous de *zai* conditionné par le renouvellement du compost/fumier. C'est donc une approche qui devrait permettre d'améliorer l'efficacité du *zai*, 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 dans la restauration des sols dégradés et la production du sorgho dans un système basé sur le *zai* en zone semi-aride.

4.2. Matériel et méthodes

4.2.1. Description du site expérimental

Les essais ont été conduits dans le village de Yilou (13°01' Nord et 01°55' Ouest) situé dans la région du Centre-Nord au Burkina Faso (Figure 28). Son climat est de type soudano-sahélien, caractérisé par des précipitations réparties sur une courte période de juin à octobre, et variant en moyenne entre 400 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 agricole 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 *zai*, et par la nécessité de promouvoir la production de biochar à partir des ressources localement disponibles (tiges de cotonnier, gousses de *Piliostigma*, tiges de sésame, résidus maraichers) comme alternative aux amendements organiques classiques (compost, fumier).

Les Lixisols, les Plinthosols et les Cambisols sont les types de sols dominants dans le terroir de Yilou (Diarisso et al., 2016). Les essais ont été conduits sur un Lixisol de texture sablo-limoneuse à la surface (0-21 cm) et argilo-limoneuse en profondeur (21-59 cm). La majorité des champs du site expérimental contient des installations de cordons pierreux.

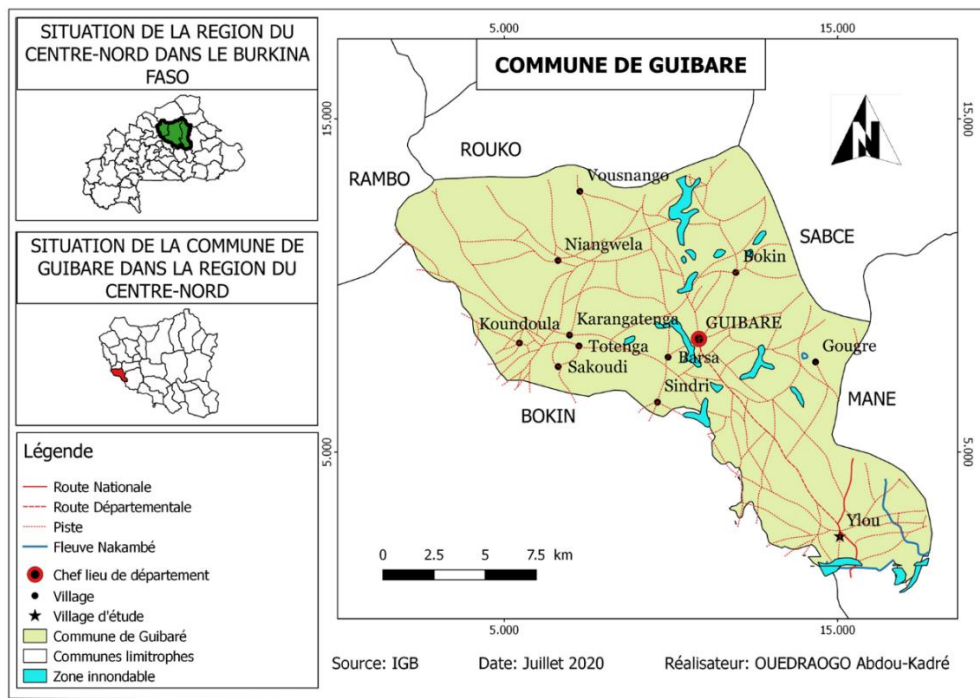


Figure 28 : Localisation du site expérimental de Yilou

4.2.2. Matériel expérimental et fertilisants utilisés

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

Les fertilisants utilisés dans les poquets de *zai* sont : le compost, le biochar non activé ou biochar pristine, le biochar-SRF, le NPK (14-23P₂O₅-14K₂O) et l'urée (46% N). Le compost utilisé a été obtenu par la technique de compostage en tas d'un mélange de résidus culturaux, d'herbacées et du fumier de bovin. Le biochar est obtenu par pyrolyse des tiges de cotonnier (*Gossypium hirsutum* (L.) dans un four *Kon-Tiki* (Cornelissen et al., 2016) pendant 20 minutes sous une température comprise entre 650-700°C. Ce biochar a été activé par macération dans une solution de NPK de concentration massique 39, 37 et 50 g/L respectivement pour N, P et K pour produire du biochar-SRF (Schmidt et al., 2017). L'ensemble des fertilisants utilisés ont été analysés (N, P, K, Ca, Mg et C-org) pour connaître leurs teneurs initiales totales.

4.2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est un bloc de Fisher complètement randomisé, comportant six (06) traitements répétés quatre fois. La parcelle élémentaire mesurait 40 m² (10 m x 4 m). Les dimensions des poquets de *zai* étaient de 40 cm de diamètre

sur 15 cm de profondeur ; les poquets étaient espacés de 80 cm entre les lignes, et 60 cm entre les poquets, soit 20833 poquets/ha. Les traitements étaient composés de :

- ✓ T0 (Témoin) = 100 g/poquet de *zai* de compost (pratique paysanne) ;
- ✓ T1 (Biochar Grande-dose) = 100 g/poquet de biochar pristine + 2 g/poquet de NPK + 1 g/poquet d'urée ;
- ✓ T2 (Microdose) = 2 g/poquet de NPK + 1 g/poquet d'urée ;
- ✓ T3 (Biochar-SRF) = 2 g/poquet de biochar-SRF + 1 g/poquet d'urée ;
- ✓ T4 (Biochar Petite-dose) = 2 g/poquet de biochar pristine + 2 g/poquet de NPK + 1 g/poquet d'urée ;
- ✓ T5 (Dose vulgarisée) = 100 g/poquet de compost + 100 kg/ha de NPK + 50 kg/ha d'urée.

Le témoin (T0) correspond à la pratique paysanne. Le compost des traitements T0 et T5 et le biochar pristine du T1 (biochar grande-dose) ont été apportés à la dose de 100 g/poquet de *zai* soit environ 2,1 t/ha à la trouaison du *zai*. La microdose a consisté à l'application de 2 g/poquet de fertilisants (NPK, biochar-SRF, biochar pristine) soit 41,67 kg/ha et 1 g d'urée/poquet soit 20,8 kg/ha. Les quantités de N, P et K apportées par chaque traitement sont résumées dans le tableau 16.

Tableau 16: Composition des traitements et quantités de N, P et K apportées sur le dispositif de Yilou en fonction des traitements

Traitements	Nom de traitement	Compost	Biochar pristine	NPK	Biochar-SRF	Urée	Qté de N, P & K apportée par le NPK et les biochars-SRF	Technique d'application de l'engrais
T0	Témoin	2083,3	0	0	0	0	16,7N+3,1P+20,2K	NA
T1	Biochar grande Grande-dose	0	2083,3	41,67	0	20,83	30N+10,5P+112,5K	Microdose
T2	Microdose	0	0	41,67	0	20,83	14,4N+2P+6,3K	Microdose
T3	Biochar-SRF	0	0	0	41,67	20,83	12,1N+1,5P+4,9K	Microdose
T4	Biochar petite Petite-dose	0	41,67	41,67	0	20,83	14,7N+2,2P+8,4K	Microdose
T5	Dose vulgarisée	2083,3	0	100	0	50	51,3N+8P+35,3K	Epannage

4.2.4 Conduite de l'essai

Les trouaisons des poquets de *zaï* sont intervenues en mai 2019, suivi d'un rafraichissement des poquets en juin 2020. Les écartements étaient de 80 cm entre les lignes et 60 cm entre les poquets. L'apport du compost et biochar pristine aux traitements T0, T1 et T5 a été effectué juste après la trouaison du *zaï* (Figure 29). Le sorgho a été semé manuellement et démarrés à trois plants/poquet (62499 plants/ha) au moment de l'application du NPK à 15 jours après semis pour T1, T2, T3, T4 et T5. Le biochar-SRF (T3), le biochar pristine (T4) et le NPK ont été appliqués au 15^{ème} jour après semis (JAS), à la dose de 2 g/poquet. L'urée a été appliqué au 40^{ème} JAS par microdose à raison de 1 g/poquet pour les traitements T1, T2, T3 et T4 soit 20,8 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. Trois sarclages manuels ont été effectués respectivement au 15^{ème}, 36^{ème} et 57^{ème} JAS. La récolte a été faite à la maturité dans des parcelles utiles de 20,16 m², comprenant 3 lignes centrales de 21 poquets chacune.



Figure 29: Poquets de *zaï* contenant du biochar pristine (Cliché F. Saba, 2019)

4.2.5 Collecte des données

Les paramètres évalués ont été 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 de sorgho a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban sur quinze plants choisis aléatoirement dans chaque parcelle utile (PU) à la première mesure (30 JAS). Les plants mesurés ont ensuite été marqués au collet à l'aide d'une ficelle pour les mesures suivantes du 45^{ème} et 60^{ème} JAS de chaque campagne agricole. A la maturité, la paille et les panicules ont été récoltées dans chaque parcelle utile puis séchées à l'air libre. Le poids des grains de chaque PU ainsi que le poids de 1000 grains ont été déterminés après battage des panicules et séchage des grains jusqu'à obtenir un poids constant

indiquant un taux d'humidité minimum. Les données obtenues ont été extrapolées à l'hectare pour évaluer les rendements.

4.2.6. *Echantillonnage et analyses physico-chimiques des sols*

Les échantillons de sols ont été prélevés à la tarière à la tarière sur la profondeur 0-20 cm suivant un transect en zigzag avant la mise en place de l'essai pour établir la situation de référence. Le second prélèvement a été effectué à la tarière à la fin de la première campagne d'expérimentation. Les échantillons ont été prélevés dans cinq trous de zai de chaque parcelle élémentaire suivant les diagonales sur la profondeur 0-20 cm, pour constituer les échantillons composites pour des analyses. Le pH du sol a été déterminé par lecture directe à l'aide d'un pH-mètre électronique 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 (PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans le sol a été déterminée après extraction dans une solution d'acétate d'ammonium-EDTA 1M (Lakanen et Erviö, 1971) dans laquelle les éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} 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 trois fractions a été déterminée par gravimétrie. 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).

$$X (\%) = \left[\frac{X_2 - X_1}{X_1} \right] * 100 \quad (6)$$

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

X_1 : correspondant à la valeur du paramètre considéré au début de l'essai,

X_2 : est la valeur du paramètre considéré à la fin de l'expérimentation.

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

L'humidité du sol a été mesurée à l'aide de capteurs d'humidité à sonde Thêta (Gaskin & Miller, 1996). Des mesures directes ont été effectuées en enfonçant les sondes dans les trous de zai. Il s'agit de mesures ponctuelles effectuées à 50, 71 et 93^{ème} JAS durant la campagne de 2020. Ces dates correspondent respectivement aux stades montaison, floraison et pleine maturité du sorgho.

4.2.7. Analyses statistiques

Les données collectées 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 du sol. Le test de *Tukey* (HSD) au seuil de probabilité de 5% a été utilisé pour la comparaison des moyennes, lorsque l'analyse de variance révèle des différences significatives entre les traitements.

4.3 Résultats

4.3.1. Propriétés des fertilisants utilisés

Les essais ont été conduits sur des parcelles aménagées en cordons pierreux. La texture de surface du sol 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 cmol.kg⁻¹ (Tableau 17). 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 713,5 et 171 mg/kg de sol. La teneur initiale en carbone organique était de 6,8 g/kg de sol.

Tableau 17 : Caractéristiques physico-chimiques du sol avant la mise en place de l'essai

Paramètres mesurés	Valeurs
Argile totale (%)	38,3±0,01
Limon total (%)	24,4±0,85
Sable total (%)	37,3±0,34
Carbone organique (g/kg)	6,8±0,02
Azote total (g/kg)	0,7±0,02
C/N	9,6±1,75
Phosphore assimilable (mg/kg)	1,2±0,09
Potassium disponible (mg/kg)	177,3±1,35
Ca (mg/kg)	713,5±6
Mg (mg/kg)	171,4±0,94
pH-eau	6,7±1,3
pH-KCl	5,1±0,12
CEC (cmol/kg)	3,9±0,2

CEC : capacité d'échange cationique ; WHC : Water Holding Capacity ou capacité de rétention en eau, C/N : rapport carbone sur azote

Les caractéristiques chimiques des fertilisants utilisés (Tableau 18) montrent que les teneurs en azote, potassium et phosphore total, sont plus élevées dans le NPK que dans le biochar-SRF et le compost. La quantité de nutriments adsorbée par le biochar était légèrement inférieure à la concentration NPK, soit 53% d'azote, 77% de phosphore et 77% de potassium disponible. Par contre, les teneurs en carbone, en

calcium et en magnésium étaient relativement plus élevées dans le biochar-SRF que dans le NPK, soit 37, 1,3 et 0,9% respectivement.

Tableau 18 : Caractéristiques chimiques du compost, biochar et NPK utilisés comme fertilisants

Substrats	C-org	N-total	P-total	K-total	Ca-total	Mg-total	pH-eau
	(%)						
Compost	10,5 ^b ± 0,2	0,8 ^c ± 0,1	1,5 ^{bc} ± 0,04	0,97 ^{ab} ± 0,2	0,1 ^a ± 0,00	0,3 ^a ± 0,01	7,5 ^b ± 0
Biochar-pristine	42,3 ^a ± 0,8	0,7 ^c ± 0,0	0,41 ^c ± 0,0	5,1 ^a ± 1,6	3 ^b ± 1,4	0,6 ^b ± 0,01	9,8 ^a ± 0,4
Biochar-SRF	37,1 ^b ± 0,2	6,1 ^b ± 0,2	3,7 ^{ab} ± 0,5	11,6 ^{ab} ± 3,5	1,7 ^a ± 0,6	0,9 ^b ± 0,04	6,2 ^c ± 0
NPK	0,32 ^d ± 0,03	11,6 ^a ± 0,3	11 ^a ± 1,7	15,1 ^c ± 774	0,21 ^b ± 0,01	0,16 ^b ± 0,05	6 ^c ± 0,0

Les valeurs suivies de la même lettre dans la même colonne, ne sont pas statistiquement différentes au seuil de probabilité 5%; les valeurs qui suivent le signe ± représentent les écart types.

4.3.2. Evolution des paramètres chimiques du sol

La figure 30 résume les variations des paramètres chimiques du sol (pH, CEC, N-total, P biodisponible, K biodisponible, Ca échangeable et Mg² échangeable) après une campagne d'application de fertilisants. Ces paramètres ont connu de faibles variations par rapport à la situation de référence. Exception faite du carbone, du phosphore et du pH-eau, où des tendances nettes se dessinent, les autres paramètres (N-total, K, Ca, Mg, CEC et pH-KCl) ont connu des variations mitigées en fonction des traitements appliqués ; tantôt positives ou négatives pour le même paramètre (Figure 30) sans toutefois être significatives. Les teneurs en phosphore et en carbone organique ont été améliorées de 18 à 285% et de 7 à 16% respectivement, par rapport à la situation initiale et en carbone de base. Ces teneurs étaient plus élevées dans les parcelles amendées avec le traitement T1, tandis que l'application de biochar-SRF en microdose (T3) a accru la CEC comparativement à la situation de référence avant l'installation de l'essai. L'apport du biochar-SRF a eu un effet positif sur les teneurs en carbone organique, en azote total, en phosphore disponible, en potassium disponible, et sur la CEC. Ce traitement a permis d'accroître la teneur en phosphore et la CEC de 66 et 54% respectivement. De façon générale, l'apport du biochar (pristine et SRF) a entraîné une baisse du pH du sol de 0,1 à 0,2 unités.

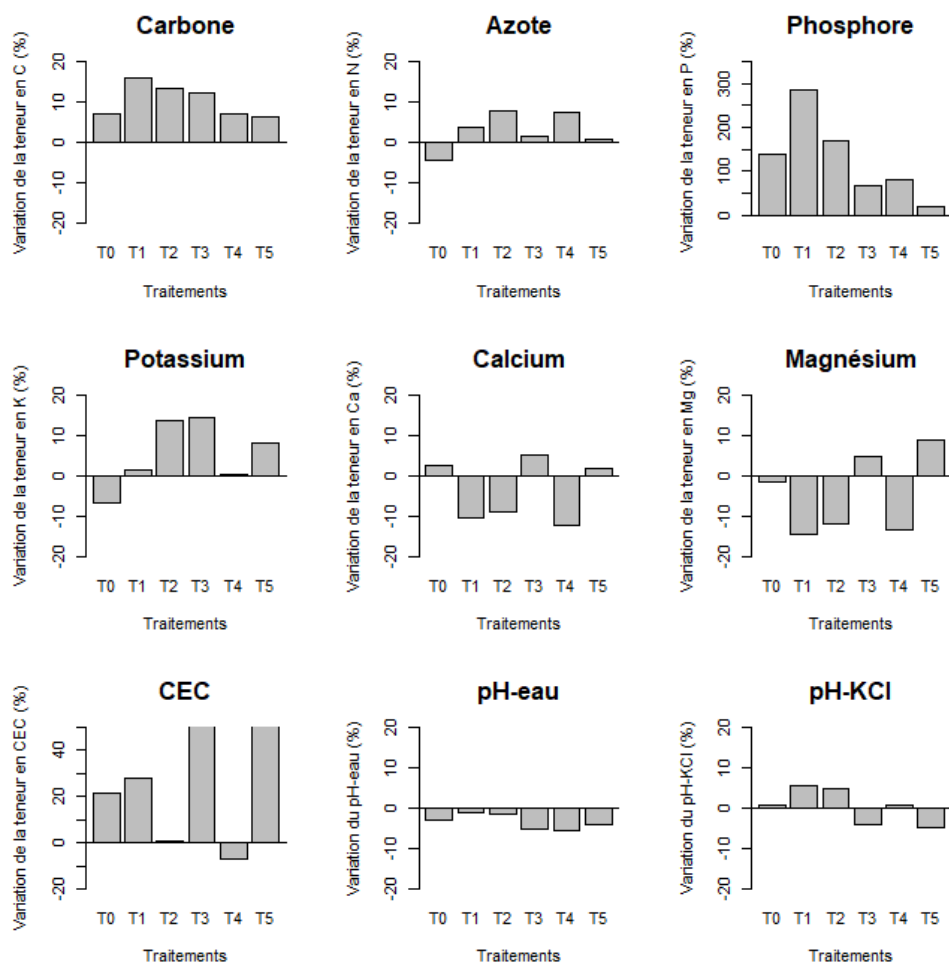


Figure 30: Variation des paramètres chimiques du sol (C-organique, N-total, P, K, Ca et Mg) disponibles) entre l'état de référence avant l'installation de l'essai en 2018 et ceux après la campagne agricole de 2018 en fonction des traitements

4.3.3. Evolution de l'humidité du sol

Les apports des différents fertilisants ont eu des effets significatifs ($p=0,00015$ et $0,0415$) sur l'humidité du sol aux 50^{ème} et 71^{ème} JAS du sorgho (Figure 31). L'humidité du sol a augmenté respectivement de 17 et 16% au stade montaison et floraison dans les parcelles avec du biochar pristine grande dose (T1), comparativement au témoin. Par contre, l'application de biochar-SRF en microdose (T3) a eu des effets similaires aux traitements T0 et T5 sur l'humidité du sol. Malgré l'absence de différence significative, l'apport en microdose du biochar-SRF (T3) a augmenté l'humidité du sol de 8% au stade maturité du sorgho (93 JAS), comparativement à T0.

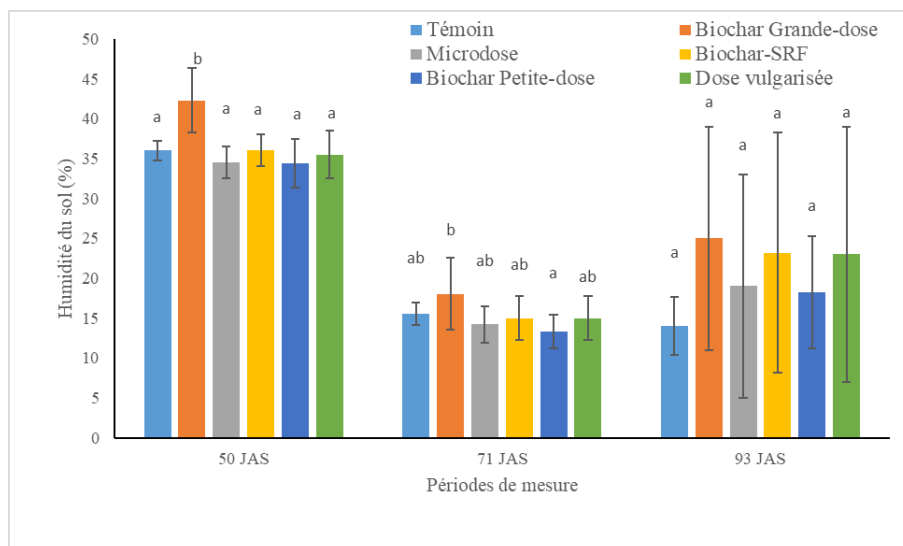


Figure 31: Variation de l'humidité du sol des profondeurs 0-20 cm en fonction des amendements

4.3.4. Variation du diamètre et de la hauteur moyenne des tiges du sorgho en fonction des traitements

La croissance globale des plants du sorgho a significativement varié en fonction des pratiques d'amendements (Figure 32), et ce, quels que soient les stades végétatifs (tableaux 16&17). Par contre, les accroissements des plantes de sorgho ont été relativement similaires durant les deux campagnes agricoles 2019 et 2020. En 2019, les accroissements les plus importants du diamètre des tiges de sorgho en pleine floraison (60 JAS) ont été observés au niveau des parcelles fertilisées par du biochar (T1, T3 et T4), suivi de celles ayant reçu du NPK apporté par microdose (T2). Les plus faibles performances ont été enregistrées avec les traitements à base du compost (T0 et T5). Le diamètre moyen des tiges de sorgho à 60 JAS ont varié de 14 à 17,1 mm en 2019, et de 13,6 à 16,6 mm en 2020 respectivement pour les traitements T0 et T1. Les tendances similaires ont été observées au cours des deux campagnes sur la croissance en hauteur des plants de sorgho. Les plantes étaient plus hautes sous le traitement T1 avec 225,5 cm, et la plus faible hauteur (171 cm) a été obtenue avec le traitement T0 en 2019. En 2020, pour la même période de mesure, la hauteur moyenne a varié de 161,2 pour le témoin T0 (pratique paysanne) à 226 cm pour T3 (biochar-SRF), soit un accroissement de 40,2%.



Figure 32: Vue partielle d'une parcelle expérimentale microdose NPK (gauche) et microdose biochar-SRF (droite) au stade montaison (Cliché F. Saba, 2020)

Tableau 19 : Variation du diamètre du sorgho en fonction des traitements au cours des campagnes agricoles 2019 et 2020

Traitements	Diamètre 2019			Diamètre 2020		
	30 JAS	45 JAS	60 JAS	30 JAS	45 JAS	60 JAS
	(cm)			(cm)		
Témoin	9,3 ^b ± 3,4	14 ^b ± 3,3	14 ^c ± 4,4	8,3 ^c ± 2,8	13,5 ^b ± 2,7	13,6 ^c ± 2,8
Biochar- Grande-dose	12 ^a ± 5,3	16,5 ^c ± 3,4	17,1 ^a ± 3,4	9 ^{ab} ± 3,7	16 ^a ± 2,5	16,6 ^a ± 2,4
Microdose	10,2 ^{ab} ± 4,5	16 ^a ± 2,7	16,2 ^b ± 3,2	8 ^{bc} ± 3,1	15,8 ^a ± 3	16,9 ^a ± 2,9
Biochar-SRF	11,3 ^a ± 4,5	16 ^a ± 2,8	16,3 ^b ± 3,1	10,2 ^a ± 3,5	16,4 ^a ± 2,3	17 ^a ± 2,5
Biochar- Petite-dose	12 ^a ± 5,2	16 ^a ± 3,1	16,4 ^b ± 3,9	8,9 ^{bc} ± 3,3	16,1 ^a ± 2,7	16,8 ^a ± 2,5
Dose vulgarisée	9,5 ^b ± 4,3	15 ^{ab} ± 2,7	15,5 ^{bc} ± 3,3	8,6 ^{bc} ± 3,3	14,1 ^b ± 2,6	14,9 ^b ± 2,6

Les valeurs suivies d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %. Légende : T0 : 100 g de compost/poquet (pratique paysanne) ; T1 : 100 g de biochar/poquet + 2 g de NPK/poquet + 1 g d'urée/poquet ; T2 : 2 g de NPK/poquet + 1 g d'urée/poquet (microdose conventionnelle) ; T3 : 2 g de biochar activé (biochar-SRF)/poquet + 1 g d'urée/poquet ; T4 : 2 g de biochar/poquet + 2 g de NPK/poquet + 1 g d'urée/poquet ; T5 : 100 g de compost/poquet + 100 kg de NPK/ha + 50 kg d'urée/ha.

Tableau 20 : Variation de la hauteur des plants de sorgho en fonction des traitements au cours des campagnes agricoles 2019 et 2020

Traitements	Hauteur			Hauteur		
	30 JAS	45 JAS	60 JAS	30 JAS	45 JAS	60 JAS
	(cm)			(cm)		
Témoin	61 ^b ± 21	131 ^c ± 47	171 ^b ± 67	74 ^c ± 10	126 ^d ± 28	161 ^c ± 49
Biochar-Grande-dose	72 ^a ± 24	168 ^a ± 47	226 ^a ± 65	79 ^a ± 11	159 ^b ± 30	221 ^a ± 36
Microdose	62 ^b ± 19	152 ^{ab} ± 42	207 ^a ± 59	73 ^c ± 9	151 ^{cd} ± 24	215 ^a ± 32
Biochar-SRF	70 ^a ± 21	165 ^a ± 47	221 ^a ± 59	78 ^a ± 11	163 ^a ± 25	226 ^a ± 38
Biochar-Petite-dose	72 ^a ± 22	165 ^a ± 50	211 ^a ± 71	75 ^{bc} ± 10	154 ^{bd} ± 25	215 ^a ± 40
Dose vulgarisée	65 ^{ab} ± 15	142 ^{bc} ± 34	178 ^b ± 53	76 ^{ab} ± 11	141 ^{cd} ± 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 *Tukey* ; les valeurs qui suivent le signe ± représentent les écarts types, nombre de répétitions = 4.

4.3.5. Rendements et poids de mille grains du sorgho

Le Tableau 21 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 rendements du sorgho en grain ($p=0,013$; $p=0,014$) et en paille ($p = 0,02$; $p=0,01$) pour 2019 et 2020 ont été significativement influencés par l'apport des différents fertilisants au cours des deux campagnes agricoles. Durant les deux saisons agricoles, le traitement biochar Grande-dose (T1) et biochar-SRF (T2) ont été plus efficaces en production de grain que le témoin (T0). Les suppléments de production dégagée par ces deux traitements par rapport au témoin (T0), étaient de 904 et 773 kg/ha et de 860 et 912 kg/ha respectivement en 2019 et 2020.

Pour ce qui est de la production en paille de sorgho, en 2019, les meilleurs rendements ont été obtenus au niveau du zai combiné au biochar Grande-dose (T1), soit une augmentation de 109% par rapport au témoin. La production en paille sous traitement zai + biochar-SRF (T3), était respectivement de 1,8 et 1,2 fois plus élevée que celles des traitements témoin (T0) et pratique vulgarisée (T5). Des variations 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, le biochar-SRF (T3) a été plus efficace sur le rendement en sorgho grain que tous les autres traitements, notamment les applications biochar non activé (T1 et T4) associé au NPK en microdose.

Les traitements appliqués ont eu des effets similaires sur le remplissage des grains de sorgho au cours de deux campagnes de production. Le poids moyen de mille grains de sorgho a varié de 21 à 24 g.

Tableau 21 : Variation des rendements moyens et poids de mille grains de sorgho en fonction des traitements

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

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

Selon le test de Tukey ; les valeurs qui suivent le signe ± représentent les écarts types, nombre de répétitions = 4.

4.3.6. Plus-value de l'activation du biochar sur le rendement

Les variations des rendements entre les traitements à base de biochar (T1, T3 et T4) n'ont pas été significatives durant les deux campagnes agricoles ($p = 0,25$ et $0,8$ respectivement pour le rendement grain et le rendement la paille). En 2019, le biochar appliqué à grande dose (T1) a induit une augmentation du rendement grain d'environ 8% par rapport à l'apport du biochar-SRF (T3) (Figure 33). Par contre, une baisse de 17,4% a été enregistrée avec le traitement T4. La production de paille de sorgho était plus élevée sur les parcelles amendées avec du biochar-SRF, comparativement à l'apport de biochar non traité associé à la microdose de NPK (T1 et T4). Des augmentations du rendement paille de l'ordre 17% et 5,2% ont été obtenues respectivement avec le traitement T1 et T4 comparativement au traitement T3 en 2020. Des augmentations de 14% et 1,3% ont été enregistrées respectivement avec le T1 et le T4 au cours de la campagne de 2020.

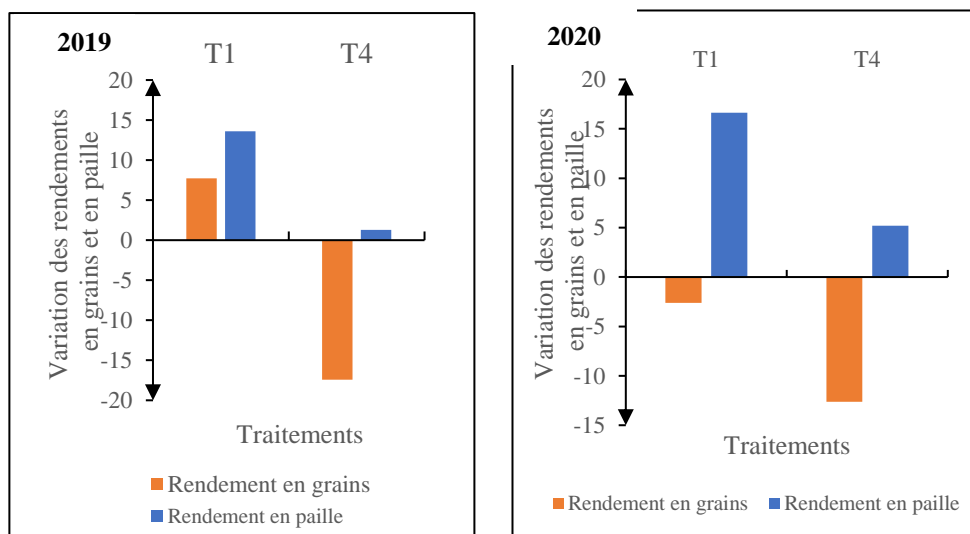


Figure 33: Variation des rendements grains et paille du sorgho entre le traitement de référence T3 (Biochar-SRF) et les autres traitements à base du biochar (T1 & T4)

4.4. Discussion

4.4.1. Effet du biochar sur l'évolution des paramètres chimiques du sol

L'apport des fertilisants a produit des réponses variables sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol. En effet, les traitements au biochar ont eu un effet positif sur le carbone organique, l'azote total et le phosphore biodisponible. Malgré l'absence de différence significative, l'augmentation de la teneur en carbone était plus élevée sous les traitements à base de biochar (T1, T3 et T4) comparativement aux parcelles ayant reçu du compost simple (T0) ou en association avec du NPK (T5). Ces résultats montrent que l'ajout du biochar en petite dose, permet d'augmenter la teneur en carbone organique du sol. De plus, sa présence réduit les pertes d'azote et la

fixation du phosphore du fait de leur adsorption dans les micropores, ce qui est très intéressant pour l'amélioration de leur disponibilité dans les sols tropicaux (Steiner et al., 2008; Zhang et al., 2016; Brassard et al., 2018). La constitution du stock du carbone du sol du fait de l'incorporation du biochar, est considérée comme l'une des fonctions essentielles principalement liée à la stabilité chimique de sa structure et à son effet positif sur la diminution de la respiration du sol, et donc de la 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) soit 2,1 t de biochar pristine + 41,67 kg/ha de NPK en microdose. Ce résultat confirme les travaux antérieurs qui ont mis en évidence la nécessité d'appliquer des doses élevées de biochar à l'état brut (biochar pristine), ou son adjonction aux engrais minéraux pour espérer des effets positifs à court terme sur des sols à fort potentiel de lixiviation (Lele et al., 2016; 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. Les effets positifs engrangés sur la CEC et le phosphore du sol ont été attribués à sa forte capacité d'adsorption et de rétention de nutriments par le biochar, cette aptitude permettant de réduire les pertes et de conserver les reliquats dans le sol pour les campagnes suivantes. L'étude a également montré qu'en dépit de la faible dose (41,67 kg/ha) et sa faible valeur nutritive, le biochar-SRF a permis d'avoir des teneurs en éléments biodisponibles nettement supérieures à la teneur initiale du sol et à l'apport de la même dose de biochar non activé (41,67 kg/ha) associé à la microdose de NPK (T4). La bonne performance du biochar-SRF pourrait principalement s'expliquer par une bonne rétention des nutriments (NH_4^+ , H_2PO_4^- , K^+) durant le processus d'activation, et leur libération lente au profit des cultures. La libération lente des nutriments est connue comme étant un facteur permettant l'optimisation de la fertilisation minérale et la productivité des sols, grâce à la préservation des fractions non utilisées par les cultures dans les interstices des micropores (Yu et al., 2018). Cependant, le mécanisme contrôlant la mobilité des nutriments entre le biochar et la solution du sol mérite d'être mieux étudié, pour optimiser le potentiel de libération lente des éléments nutritifs en fonction des besoins du sorgho durant son cycle. L'optimisation du mécanisme de libération lente permet de maximiser la biodisponibilité des nutriments pour les cultures, tout en minimisant les pertes des éléments nutritifs par lixiviation et/ou lessivage (Agyarko-Mintah et al., 2017; Shi et al., 2020), et pourrait contribuer à réduire les consommations de luxe et la pollution de l'environnement dans les agroécosystèmes.

Contrairement aux travaux de Gwenzi et al. (2018), et Pandit et al. (2018), l'incorporation du biochar a induit une légère baisse du pH du sol. Cette acidification du sol 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 des sels basiques du biochar auraient pu avoir. Elle pourrait aussi être liée à une faible proportion des cendres dans le biochar utilisé, car lessivées par l'eau utilisée pour l'arrêt de la pyrolyse. Ces cendres

organiques sont très souvent associées à l'alcalinisation du sol suite à l'incorporation du biochar. L'adjonction des engrais minéraux au biochar pourrait également être évoquée dans la baisse du pH par apport de potentiels 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. Ce phénomène a été confirmé dans les travaux de (Ahmad et al., 2018; Panwar & Pawar, 2020), qui ont enregistré des baisses du pH allant de 0,2 à 3 unités suite à l'activation du biochar avec des substances acidifiantes ou le NPK. Le même phénomène a été observé avec l'utilisation du biochar de balle de riz produit à faible température (environ 300°C) sur des sols acides, et avec l'incorporation du biochar dans des sols sableux à pH élevé (Shetty & Prakash, 2020). Selon ces auteurs, cette diminution du pH est liée à l'oxydation des groupements fonctionnels du biochar.

4.4.2. Effet du biochar sur l'humidité du sol

L'augmentation de l'humidité du sol suite à l'apport de biochar grande-dose (2,1 t/ha) comparativement à la pratique paysanne (T0), pourrait s'expliquer par une amélioration de la porosité du sol suite à l'application de biochar. Selon Blanco-Canqui (2017), l'incorporation du biochar au sol permet de modifier sa porosité globale suite à l'amélioration de la structure du sol, ou indirectement par son action bénéfique sur les microorganismes du sol. De plus, les capacités d'adsorption du biochar pourraient être grandement bénéfiques dans des sols sableux à faible rétention en eau, et pour la potentielle augmentation de rétention en eau comme réserve d'eau en périodes de sécheresse. D'ailleurs, le biochar utilisé avait une forte capacité de rétention d'eau (Tableau 3) ; de ce fait, son incorporation au sol permettrait d'accroître le niveau de stockage d'eau, et prolonger sa capacité à fournir ainsi de l'eau aux plantes pendant les périodes de sécheresse (Uzoma et al., 2011; Duong et al., 2017). En outre, grâce à leur faible densité, le biochar est susceptible d'améliorer la densité apparente des sols et de réduire leur sensibilité au tassement, ce qui agirait positivement sur la capacité d'infiltration de l'eau (Rumpel, 2017). Toutefois, cette capacité à fournir l'eau stockée aux cultures ne dépend pas nécessairement de ces facteurs, car ils n'augmentent pas le volume des pores qui impacte directement sur l'eau disponible pour les plantes (Novak et al., 2012; Ulyett et al., 2014). Dans leurs travaux, Pandit et al. (2018) et Razzaghi et al. (2020) ont rapporté une augmentation de l'humidité du sol à la capacité au champ de 7 à 51% suite à l'apport de 2% de biochar dans un sol à texture grossière. Selon Basso et al. (2013), l'amélioration de l'humidité du sol serait liée 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 amendées au biochar. Par ailleurs, cette étude a montré que l'application de doses élevées de biochar (T1) dans les trous de *zai*, s'est révélée plus bénéfique pour la conservation de l'humidité du sol par rapport à l'apport localisé de petite quantité de biochar activé (T3) ou non (T4). Ce résultat confirme les travaux de Hagemann et al. (2017), selon lesquels les revêtements organiques de surface formés lors de l'activation du biochar, étaient fortement impliqués dans l'amélioration de l'humidité du sol, grâce à la réduction des volumes poreux du biochar une fois appliqué. En effet, la multiplication des pores de petite taille dans les particules de biochar, favorise une bonne rétention en eau car ils augmentent la remontée capillaire.

Cependant, cette réduction des volumes poraux pourrait être handicapant en zone aride pour une fourniture convenable d'eau aux cultures suite à l'application de biochar activé. Pourtant, dans le contexte de climat changeant, l'amélioration du bilan hydrique du sol revêt toute son importance étant donné la grande variabilité des quantités de pluies et sa mauvaise répartition (Ibrahim, 2012).

4.4.3. L'effet de l'apport du biochar sur la croissance et les rendements du sorgho

En 2019, les rendements en sorgho grain ont été plus élevés avec les applications de biochar à grande-dose (T1) et biochar-SRF (T3), comparativement au témoin (T0) et à la dose vulgarisée (T5). La production la plus élevée de paille de sorgho a été obtenue avec le biochar-SRF (T3), ce qui pourrait être avantageusement exploitée pour la restauration de la fertilité des sols par le biais du compostage ou paillage. 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 du paillage.

Ces meilleures performances (en grain et paille) obtenues par l'ajout du biochar-SRF malgré l'application d'une faible quantité de nutriments contrairement aux traitements conventionnels d'apport de NPK (Tableau 18), pourraient être attribuées d'une part à l'amélioration des caractéristiques chimiques du sol, et d'autre part au rythme de libération lente des nutriments (Dietrich et al., 2020 ; Shi et al., 2020). Lélé et al. (2016) ont expliqué les rendements élevés sous des engrais SRF par 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 à la demande des cultures (AlShamaileh 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 $\text{P-H}_2\text{PO}_4^-$ inférieur à celui d'un engrais chimique conventionnel. Ce mécanisme limiterait les pertes et faciliterait une meilleure absorption des nutriments par les racines des plants, assurant ainsi une bonne croissance et l'amélioration des rendements du sorgho. Les effets positifs du biochar dans le sol ont conduit à une nette amélioration de la CEC, ce qui s'est traduit par accroissement du rendement (Tableau 21). 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 était statistiquement homogène pour l'ensemble des traitements. Outre l'amélioration de la capacité d'échange cationique, le supplément de rendement induit par le biochar peut 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 sécheresses qu'a connu la campagne agricole. Les 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 grâce à l'augmentation de l'humidité du sol. Les variations des rendements entre les deux campagnes étaient plus élevées dans les parcelles amendées

par biochar, comparativement aux 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). Aussi, l'apport du biochar-biochar-SRF (T3) a eu un meilleur rendement par rapport à l'adjonction de petite quantité de biochar pristine et du NPK en apport microdose (T4), confirmant ainsi 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.

4.4.4. Efficacité agronomique de l'activation du biochar

Considérant les paramètres chimiques du sol, l'apport du biochar-SRF a été plus bénéfique à l'amélioration de la CEC comparativement à l'apport du biochar pristine grande et petite dose. Ce résultat indique que l'activation permet de bonifier les aptitudes de rétention des nutriments par le biochar, via le développement de charges négatives. En effet, au cours de l'activation du biochar, ils se créent de nouveaux groupes fonctionnels à sa surface, ce qui peut contribuer à favoriser la rétention des éléments minéraux pour une libération lente et progressive (Hagemann et al., 2017). La présence de pores et des différents groupes fonctionnels tels que des hydroxyles, acides carboxyliques, et petites chaînes alkyles, augmentent la capacité de rétention des nutriments du biochar activé (Brewer et al., 2014). Ainsi, la faible performance enregistrée avec l'adjonction du biochar pristine aux engrais minéraux (T1 & T4) malgré leur apport en nutriments plus élevé que le biochar-SRF, pourrait s'expliquer par le fait que les nutriments apportés par les fertilisants sont facilement lixiviés suite aux premières pluies. Ces avantages susmentionnés se sont traduits par un rendement grain plus élevé en 2020 avec le biochar-SRF, comparativement à l'adjonction du biochar pristine à grande ou à petite dose associé aux engrais minéraux. Ceci confirme que l'adjonction du biochar pristine aux engrais minéraux ne permet pas de stimuler la libération lente, confirmant l'importance d'activer le biochar avec les fertilisants avant apport (Dietrich et al., 2020).

4.5. Conclusion partielle

Cette étude a été conduite afin d'évaluer l'efficacité du biochar-SRF dans la restauration des sols dégradés et la production du sorgho dans un système zai en zone semi-aride. Les composantes de rendement du sorgho ont montré que l'apport du biochar associé à la pratique du zai, permet de restaurer le potentiel de production d'un sol dégradé. La restauration du sol par le biochar s'est traduite par une amélioration de l'humidité du sol et la disponibilité en éléments nutritifs notamment le phosphore et le potassium. L'amélioration de l'humidité et des paramètres chimiques du sol par le biochar a permis de doubler les rendements du sorgho par rapport à la pratique paysanne. Par rapport au biochar pristine (non activé), l'activation du biochar (biochar-SRF) s'est révélé plus efficace et bénéfique grâce au

mécanisme de libération lente des nutriments qu'elle favorise. Cette étude suggère qu'à défaut d'activation, le biochar doit être apporté à des doses élevées d'au moins 2,1 t/ha/an, et combiné aux engrais minéraux pour une bonne réponse à court terme.

Au regard des résultats obtenus, l'utilisation de fertilisant à libération lente à base de biochar activé et apporté en faible dose, pourrait constituer un moyen d'accroître la production agricole et de restaurer la fertilité des sols dans les régions semi-arides.

Dans une perspective de vulgarisation du biochar auprès des producteurs, il est nécessaire d'explorer d'autres sources de biomasse locales disponibles (tiges de sésame, résidus maraichers, gousses de *Piliostigma*) pour la production de biochar de bonne qualité.

4.6. Références bibliographiques

- 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>
- 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. - 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>
- 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>
- 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
- 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. feng, 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., & Tiftonell, 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>
- 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.
- 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>
- Hillebrand, W. F., Lundell, G. E. ., Bright, H. ., & Hoffman, J. I. (1953). *Applied inorganic analysis*. John Wiley(2 nd ed.), 1034p.
- 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>
- 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.
- Melaku, T., Ambaw, G., Nigusie, 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>

- Novak, J. M., Busscher, W. J., Watts, D. W., Amonette, J. E., Ippolito, J. A., Lima, I. M., Gaskin, J., Das, K. C., Steiner, C., Ahmedna, M., Rehrh, D., & Schomberg, H. (2012). Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols. *Soil Science*, 177(5), 310–320. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31824e5593>
- 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>
- 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. XXVIII, Ilo 2, 1993: 159-173, XXVIII(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>
- 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>
- 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.

- Yu, X., Tian, X., Lu, Y., Liu, Z., Guo, Y., Chen, J., Li, C., Zhang, M., & Wan, Y. (2018). Combined effects of straw-derived biochar and bio-based polymer-coated urea on nitrogen use efficiency and cotton yield. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 30(1), 112–122. <https://doi.org/10.1080/09542299.2018.15187>

Chapitre 5

**Discussion générale, conclusion,
recommandations et
perspectives**

Chapitre 5. Discussion générale, conclusion, recommandations et perspectives

Au Burkina Faso, les sols subissent de fortes dégradations sur l'ensemble des zones agroécologiques, se traduisant par des pertes de la biodiversité, l'épuisement du stock organique et des nutriments, et une diminution de la productivité agricole. Les principales causes de cette dégradation sont liées à la variabilité climatique et aux activités anthropiques, telles que la mise en culture continue des terres avec une faible compensation des exportations des nutriments par les cultures, la déforestation, le surpâturage et le travail excessif du sol etc. (Beaudet, 1992; Sawadogo et al., 2008). Dès lors, tester des solutions innovantes et moins contraignantes, s'avère crucial pour le maintien de la fertilité et la qualité des sols, et pour accroître les rendements agricoles chez les petits producteurs. Ce besoin a suscité un intérêt à tester les fertilisants à libération lente à base de biochar sur l'évolution de la qualité du sol et le rendement des cultures dans les agrosystèmes à base de *zai* et dans une rotation coton-maïs dans la zone ouest. Ainsi, l'objectif global de cette étude était de contribuer à la gestion durable des sols par l'utilisation combinée de fertilisants à libération lente à base de biochar issu de ressources organiques disponibles localement et peu valorisés et par microdose. Pour atteindre cet objectif, il a fallu :

- i. Produire et caractériser le taux d'adsorption et de relargage des nutriments par le biochar ;
- ii. Evaluer les effets de l'apport de biochar-SRF issu de deux types d'activation sur rendements des cultures, les paramètres chimiques du sol et l'efficacité d'utilisation des nutriments ;
- iii. Evaluer l'effet de l'application du biochar activé ou non sur le rendement du sorgho et l'évolution à court terme des paramètres chimiques du sol dans un système à base de *zai*.

5.1. Discussion générale

Les travaux menés dans le cadre cette thèse ont pour objectif de contribuer à l'amélioration durable de la productivité des terres cultivées dans les agrosystèmes de l'Ouest et du Centre-nord du Burkina Faso. Le choix de ces zones agroécologiques tient compte du fait que la zone ouest du pays est une grande zone de production de coton et de maïs, ayant un potentiel énorme de fourniture de tiges de cotonnier comme résidus de culture pour la production du biochar. Quant à la zone du Centre-nord, son choix réside dans le fait que le *zai* est une technique ancestrale de la localité, mise en œuvre par les producteurs comme pratique de récupération de ces terres, et dont la performance est réduite par les cuirasses ferrallitiques, les aléas climatiques et la faible disponibilité de fumure organique de qualité. Par conséquent, les activités de recherche ont été élaborées afin de résoudre certaines contraintes liées à la faible fertilité des sols, en apportant des éléments de réponses aux questions suivantes :

- **Q1)** Quel serait l'effet de la variation de la concentration de la solution de NPK mélangée avec le biochar sur les propriétés physico-chimiques des

- biochars-SRF produits, notamment son taux d'adsorption des nutriments et le niveau de pertes observées durant le processus ? Quelle serait alors la dynamique de relargage des éléments adsorbés au cours de la macération ?
- **Q2)** Au cas où la réponse à la variation de la solution nutritive était positive, quel serait alors l'impact d'un éventuel enrobage du biochar-SRF de gomme arabique sur les rendements des cultures associées, les paramètres chimiques du sol, et l'efficacité d'utilisation des nutriments ?
 - **Q3)** Quel serait l'impact de l'apport du biochar de tiges de cotonnier chargé avec une solution de NPK, sur la restauration de la productivité des sols dégradés et les rendements du sorgho en système zaï sous climat semi-aride, comparativement à l'application microdose de NPK ? La recherche des réponses à ces questions a valu la conduite de tests au laboratoire, en station de recherche et en milieu paysan pendant trois campagnes agricoles.

5.1.1. Optimisation de la fertilisation minérale par l'utilisation du biochar

Les investigations menées au laboratoire visaient dans un premier temps à caractériser les biochars-SRF produits à partir trois solutions de solution de NPK de concentrations croissantes, obtenues à partir des doses de NPK couramment utilisées en milieu rural au Burkina Faso. Leur concentration en éléments totaux et biodisponibles (N, P, K, Ca et Mg)), le niveau de pertes enregistrées au cours du processus d'activation et leur efficacité agronomique en culture de maïs en pot, et l'efficacité d'utilisation des nutriments, ont montré que des biomasses locales pouvaient être recyclées sous forme de biochar, pour ensuite produire des fertilisants à libération lente pour des applications localisées. Considérant les apports nutritifs, la teneur en éléments nutritifs du biochar-SRF avoisinait la moitié de celle de l'engrais NPK. Malgré leur faible valeur fertilisante, leurs apports en microdose pourraient valablement remplacer l'application du NPK, du fait d'une bonne maîtrise du flux des nutriments essentiels dans le système sol-plante. En effet, les résultats obtenus ont montré des augmentations significatives de la teneur en nutriments avec l'accroissement de la concentration de la solution de NPK utilisée pour activer le biochar. Cette aptitude revêt une importance capitale dans les agrosystèmes où les engrais disponibles sur le marché ne sont pas adaptés aux céréales. Les variations du niveau d'adsorption pourraient donc permettre de faire des formulations adaptées à chaque type de culture, et selon les conditions agroécologiques. Cependant, l'étude a révélé une faible adsorption du phosphore par rapport au potassium et à l'azote. Ce résultat corrobore les études antérieures (Arbelaez Breton et al., 2021; Yi & Chen, 2018) qui ont observé une certaine affinité et même des actions synergiques entre le degré d'adsorption du phosphore et la présence du magnésium/calcaium à la surface du biochar. Cette étude a aussi montré que le biochar-SRF produit avait un faible taux de relargage des éléments nutritifs (nitrates et de phosphore) par rapport au NPK. Les caractéristiques de libération lente des nutriments obtenues avec le biochar-SRF125 est moins efficace que celles définies par CEN, qui voudrait que seulement 15% des nutriments adsorbés soient relargués dans les premières 24 heures et que ce relargage devrait se poursuivre au-delà de 28 jours après l'application de cet engrais-SRF au sol (Trenkel, 2010). Néanmoins, les effets positifs de son apport se sont traduits par une

production équivalente de biomasse entre le NPK et le biochar-SRF, malgré que ce dernier était moins fourni en nutriments. De ce fait, il conviendrait de nuancer la conclusion, étant donné que ces critères d'évaluation de la libération lente ont été définis à partir des engrais-SRF issus de la nanotechnologie (Duhan et al., 2017; Sahai et al., 2019), et que les profils de relargage du biochar-SRF pourrait connaître une autre dynamique différente dans une expérience en colonne de lixiviation ou en plein champ. L'adoption de ces fertilisants à libération lente, pourrait être une réponse appropriée aux enjeux environnementaux et économiques que pose l'utilisation des engrais minéraux de synthèse. Du point de vue environnemental, l'apport des engrais-SRF permet d'augmenter la biodisponibilité des nutriments pour les cultures étant donné que les nutriments appliqués ont l'avantage d'être plus concentrés et directement assimilables par les plantes, donc sont moins susceptibles d'être lessivés avec les eaux ; ce qui contribue à la réduction des risques de pollution environnementale et les effets acidifiants de certains types d'engrais. De même, outre la faisabilité de la production de ce biochar-SRF dans le contexte agricole de la zone Ouest du Burkina, son adoption pourrait constituer une option économiquement rentable pour les petits producteurs. En effet, avec le faible niveau de fertilité des sols agricoles, le recours aux engrais minéraux reste le principal moyen pour maintenir des niveaux de production élevés en réponse aux attentes sociétales. Cela nécessite des sorties massives de devises pour leur approvisionnement. Pourtant, cette étude a montré que l'adoption des engrais-SRF pourrait permettre d'économiser au moins un tiers des quantités apportées, ce qui représente des marges à gagner pour le producteur moyen.

5.1.2. Mécanismes sous-jacents de l'efficacité du microdosage du biochar-SRF et du NPK

Du fait des carences en éléments essentiels des sols des zones d'étude, la pratique de la fumure minérale joue un rôle capital dans l'amélioration des rendements des cultures. Cependant, les rendements moyens restent faibles malgré l'utilisation des engrais, et les sommes allouées aux achats d'engrais minéraux ne sont toujours pas rentabilisées du fait de la faible efficacité d'utilisation des nutriments par les cultures (Tabo et al., 2011; Amonmide et al., 2019). En plus, la pratique de la fumure minérale exclusive est préjudiciable au sol, et s'accompagne généralement d'une baisse annuelle de 2 à 4% de la matière organique (MO) et de l'augmentation de l'acidité des terres cultivées (Berger et al., 1987; Bonzi et al., 2008; Pouya et al., 2020; Ouedrogo et al., 2020). Des études ont montré que si rien n'est fait, au bout de quinze années de pratiques, on atteint une situation de non réponse aux fertilisants. La microdose qui est une forme particulière d'apport localisé de petites quantités d'engrais minéraux dans les poquets de semis, est l'une des solutions récemment introduites pour améliorer l'efficacité des engrais et limiter leurs effets nuisibles sur l'environnement par l'utilisation des doses modérées (Sime & Aune, 2014; Tovihoudji et al., 2017). La technique a contribué à une augmentation substantielle des rendements des principales spéculations (maïs, sorgho, mil, niébé) en moyenne de 68%, allant souvent du simple au double avec un impact positif sur le revenu des petits producteurs (Saba et al., 2017; Ouedraogo et al., 2020; Sanogo et al., 2020). Cette bonne performance est attribuée à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des nutriments induit par leur concentration à proximité des systèmes racinaires (Ibrahim

et al., 2016; Aune, 2020). De même, il a été démontré que la localisation des nutriments dans la zone racinaire surtout l'azote stimulait leur croissance, ce qui permettait aux plantes de développer une certaine vigueur ("effet starter") dès le départ pour résister aux stress de début de saison (Tabo et al., 2011). Malgré ses performances inégales, sa forte demande en main d'œuvre et l'instabilité spatio-temporelle des réponses à la microdose ont été reconnues comme étant des contraintes majeures qui handicapent l'adoption de la technique à grande échelle (Bienders & Gérard, 2015; Sanogo et al., 2020). Toutefois, la combinaison de la microdose avec des pratiques complémentaires surtout les mesures de conservation de l'eau, pourrait contribuer à l'amélioration et à la stabilisation des rendements sous pratique microdose (Ouedraogo et al., 2020). Ainsi, la conservation de l'humidité du sol induit par le *zai*, associée à de faibles doses d'amendement organique à la microdose de NPK, favorise une meilleure absorption des nutriments en cas de sécheresse et conduit à augmenter les rendements du sorgho (Barro et al., 2018). C'est fort de ce constat, que du biochar qui agit positivement sur la rétention de l'eau et des éléments nutritifs a été introduit afin d'accroître la performance de la microdose et stabiliser ces réponses, en particulier lorsque le biochar est activé pour créer des engrais à libération lente. Nos travaux ont montré que le biochar-SRF produit par macération du biochar avec la solution NPK, relarguait moins de nutriments que le NPK. Dans le cas d'une formulation SRF enrobé avec des polymères biodégradables comme la gomme arabique, l'amidon ou l'argile, le relargage pourrait être ralenti par l'effet plastifiant que cette substance opère au niveau des pores (Guan et al., 2014; Dong et al., 2019). Le mécanisme responsable de la libération lente des nutriments par le biochar-SRF pourrait bien contribuer à améliorer la pratique de la microdose notamment, soit en réduisant le nombre d'apports en passant de deux apports pour l'azote en une seule application durant le cycle de production, soit par la réduction des quantités d'engrais à appliquer. Cela aura l'avantage direct de lever la contrainte liée à l'adoption à grande échelle de la microdose, tels que le faible accès aux engrais et la forte demande en main d'œuvre (Sanogo et al., 2020), tout en améliorant l'efficacité d'utilisation des nutriments par les plantes et donc des rendements agricoles. La levée de la contrainte de main d'œuvre pourrait par conséquent favoriser une adoption massive de la microdose, conduisant à une réduction des coûts liés à l'achat des engrais, à l'amélioration de la sécurité alimentaire grâce à l'accroissement des rendements. Dans cette perspective, l'enrobage du biochar-SRF enrobé de gomme arabique, pourrait être une technique supplémentaire pour augmenter l'efficacité agronomique de l'azote et le rendement des cultures dans les sols tropicaux pauvres.

5.1.3. Réponse des paramètres du sol et des cultures aux engrais SRF à base de biochar

Les résultats positifs des tests agronomiques en pot et de la caractérisation chimique des biochars-SRF, ont permis d'identifier le Biochar-SRF125 pour des tests agronomiques en plein champ en station de recherche, en comparaison avec les pratiques courantes de fertilisation que sont la microdose et l'épandage du compost associé aux engrais minéraux. Conforté par les indicateurs obtenus avec la macération du biochar avec la solution de NPK, notamment sa teneur en nutriments et son faible taux de libération de nutriments par rapport au NPK, de la poudre de gomme arabique

a été ajoutée durant le processus d'activation pour enrober le SRF produit. Ceci, afin de déterminer si l'enrobage du biochar renforce le taux d'adsorption des nutriments et améliore le mécanisme de libération lente, facteur capital pour accroître les rendements des cultures et l'efficacité d'utilisation des nutriments dans les sols sableux. La démarche opératoire de cette expérience visant la recherche de solution alternative, est construite autour de la question suivante : Quel serait l'impact de l'ajout du biochar-SRF enrobé de gomme arabique ou non sur les rendements des cultures associées, les paramètres chimiques du sol, et l'efficacité d'utilisation des nutriments ?

Cette investigation part du fait que la cherté et l'inaccessibilité des engrais minéraux par la majorité des petits producteurs dans les zones d'étude, accentuent le rationnement des engrais, qui combinés à la faible efficacité des engrais minéraux occasionnent des baisses de rendements en dépit des applications répétées (Compaoré et al., 2001; Pouya et al., 2013). En plus, cette cherté des engrais justifie aussi le nombre élevé de cotonculteurs dans la zone qui transfère une partie des engrais obtenus grâce aux facilités offertes par les sociétés cotonnières, sur les autres cultures (Maître d'Hôtel & Porgo, 2018). Des tests agronomiques ont été conduits pour évaluer l'efficacité de l'ajout du biochar-SRF sur les paramètres agro-pédologiques. Les résultats issus des tests ont établi que le biochar-SRF pourrait donner les mêmes résultats que le NPK en application microdose dans la culture de maïs et de sorgho. Cette performance du biochar-SRF, attribuée à la bonne disponibilité et à la synchronisation des besoins des plantes et le relargage des éléments nutritifs, favoriserait une meilleure absorption par les cultures (Guan et al., 2014 ; AlShamaileh et al., 2018). Elle serait aussi liée à l'amélioration des conditions hydriques favorables à une bonne absorption des éléments nutritifs dans la zone racinaire, corroborant ainsi les travaux de Wen et al. (2017). Selon ces auteurs, le biochar à base de tiges de cotonnier imprégné de solution d'ammonium, augmente significativement la rétention de l'eau, et réduit efficacement le taux de libération et les pertes d'azote par lessivage de 10,3%. Cela s'est traduit par une grande efficacité d'utilisation de l'azote (64,27%), et un accroissement du rendement de maïs de 15,1 à 18,4% sous les parcelles amendées avec du biochar imprégné d'ammonium par rapport aux parcelles ayant reçues du NH_4Cl pur. Cette caractéristique du biochar-SRF apparaît comme une solution adéquate pour une utilisation optimale des nutriments par les plantes dans les sols à forts potentiels de pertes nutritifs (Gwenzi et al., 2018; Dong et al., 2019). Il se pourrait que ce mécanisme de fourniture en nutriments soit peu adapté pour le cotonnier, ou que la productivité du cotonnier a été réduite par un faible apport en potassium par rapport aux doses couramment appliquées. En effet, dans la pratique réelle de fertilisation du cotonnier, ce besoin est généralement comblé par des apports supplémentaires d'engrais KCl (Koulibaly et al., 2016). Globalement, le test en station a montré que les cultures présentaient des réponses variables à l'application du biochar-SRF, d'où la nécessité d'adapter le dosage à chaque culture. Cette nécessité de vulgarisation des doses adaptées à chaque culture s'est bien manifestée à travers la différence de réponse obtenue sur le maïs et le cotonnier, malgré que tous deux ont leurs grands besoins en nutriments vers la fin de leur cycle. Ainsi, l'application du biochar-SRF devraient sans doute permettre de synchroniser le relargage des nutriments avec la demande de la plante, ce qui permet de limiter les pertes et

conserver suffisamment d'éléments nutritifs dans ses pores pendant une longue période pour boucler cycle végétatif (Guan et al., 2014; AlShamaileh et al., 2018). Les résultats des expérimentations en station ont montré que l'enrobage du biochar-SRF augmentait l'efficacité d'utilisation de l'azote, sans toutefois augmenter significativement le rendement par rapport à la microdose de NPK. Ces résultats mitigés impliquent de ré-évaluer au laboratoire les principes d'activation et de charge en nutriments du biochar, en faisant varier la quantité de doses de gomme arabique pour atteindre les objectifs agronomiques et pédologiques désirés. Nous avons aussi conduit des essais complémentaires sous climat semi-aride, pour comparer la plus-value de l'activation du biochar comme pratique de restauration du pouvoir productif des sols dégradés en culture de sorgho sous pratique de *zai*. Les investigations autour de cette thématique ont été appréhendées sous la question suivante : quel serait l'impact de la valorisation agricole de biochars issus de la pyrolyse l'apport du biochar de tiges de cotonnier imprégné de solution de NPK ou non et combiné avec la microdose de NPK, sur la restauration de la productivité des sols dégradés et les rendements du sorgho sur système *zai* en climat semi-aride ? Les résultats issus de cette expérimentation, ont confirmé les réponses hétérogènes obtenues en station sous amendement biochar. Sous climat semi-aride, l'apport de grandes doses 2,1 t/ha de biochar pristine associée à la microdose du NPK dans le *zai*, semblait mieux améliorer les rendements du sorgho comparativement aux apports de petites quantités, démontrant que l'efficacité du biochar-SRF dépend non seulement du dosage utilisé, des paramètres du sol, mais aussi du type de spéculation (Olmo et al., 2016; Brassard et al., 2018). La bonne performance de ce traitement pourrait s'expliquer par une amélioration de l'humidité du sol, facteur important de productivité en climat aride, et par une augmentation de la disponibilité des nutriments du sol pour les plantes (Haider et al., 2017; Manzoor et al., 2022).

En outre, les analyses des échantillons de sol ont montré que l'apport du biochar a eu des effets positifs sur le carbone du sol, le phosphore et la CEC, même si les variations obtenues n'ont pas toujours été significatives.

5.2. Conclusion Générale

Le maintien de la fertilité des sols est l'un des principaux enjeux pour booster les productions agricoles nécessaires pour réduire l'insécurité alimentaire au Burkina Faso. Malgré les efforts consentis pour améliorer la performance de la fertilisation minérale, notamment à travers les subventions d'engrais et la vulgarisation des technologies approuvées comme la microdose, les rendements obtenus demeurent toujours faibles. Cette étude est une contribution à la recherche de solutions durables à même d'accroître la qualité des sols cultivés, l'efficacité d'utilisation des nutriments et les rendements des cultures, à travers l'utilisation des fertilisants à libération lente à base de biochar issu du recyclage de biomasses locales (tiges de cotonnier). De nos investigations au laboratoire sur le biochar-SRF produit, nous retenons que la concentration initiale de la solution nutritive influence positivement la qualité nutritive finale du biochar-SRF, et son impact sur la production de biomasse.

Ainsi, les teneurs les plus élevées en éléments nutritifs du biochar-SRF ont été obtenus avec la plus forte dose de NPK. De ces résultats, il apparaît que notre

hypothèse 1 a été vérifiée, car il existe une relation directe entre l'augmentation de la dose de NPK et le degré d'adsorptivité des nutriments par le biochar. Ainsi, le Biochar-SRF150 produit avec une dose équivalente de 150 kg/ha de NPK (14-23-14), était plus chargé en nutriments que ceux produits 100 et 125 kg/ha de NPK.

Les essais agronomiques conduits en station ont montré que les rendements des cultures durant les trois campagnes de production sous les parcelles fertilisées avec le biochar-SRF enrobé, étaient similaires à ceux obtenus avec l'apport de biochar-SRF simple ; par contre l'apport des biochars-SRF a amélioré l'efficacité d'utilisation de l'azote, particulièrement lorsque le biochar est enrobé de gomme arabique. Ces résultats permettent de rejeter partiellement l'hypothèse 2 selon laquelle, l'enrobage du biochar-SRF avec la gomme arabique permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments et les rendements des cultures associées par rapport au biochar-SRF simple, grâce au renforcement du mécanisme de libération lente. En effet, l'enrobage du biochar a permis une légère amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote par rapport au biochar-SRF (T3), mais cette amélioration n'a pas été significative et cela ne s'est pas traduit par un accroissement significatif de rendement.

L'apport du biochar a eu des effets positifs sur les rendements du sorgho, de même que sur l'humidité du sol, la teneur en carbone, en phosphore et la CEC. L'évolution de ces paramètres est un facteur déterminant sur la restauration du pouvoir productif des sols encroutés sous climat aride. La troisième hypothèse a donc été vérifiée. Les variations observées entre les rendements sous biochar-SRF et ceux sous biochar pristine-Grande et Petite-doses, étaient mitigées. En effet, la production de paille de sorgho était plus élevée sous les traitements biochar-SRF au cours des deux campagnes ; par contre, seul le rendement grain sous biochar-SRF en 2019 était plus élevé que ceux obtenus avec le biochar pristine Grande et Petite dose. La quatrième hypothèse de notre étude n'a donc été que partiellement vérifiée.

De nos travaux, nous retenons que l'application du biochar-SRF est un élément déterminant dans la nutrition minérale pour améliorer la disponibilité en nutriments pour les cultures. Cela pourrait être essentiel pour modifier le calendrier des apports d'engrais, et réduire les doses à apporter dans les rotations. La fertilité des sols dans les agrosystèmes cotonniers pourrait être améliorée par le recyclage des tiges de cotonnier en biochar enrichi en nutriments, sous forme enrobée ou non. En zone semi-aride, les résultats suggèrent qu'à défaut d'activation, le biochar doit être apporté à des doses élevées en combinaison avec les engrais minéraux pour produire des réponses à court terme, et ceci pourrait constituer un moyen d'accroître la production agricole et restaurer la fertilité des sols.

Au terme de cette étude et au vu des résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'introduction du biochar offre la possibilité d'accroître les rendements des cultures avec des doses modestes d'engrais dans les agrosystèmes du Burkina Faso.

5.4 Recommandations et perspectives

L'introduction des fertilisants à libération lente dans les systèmes de culture, constitue une innovation et marque un pas décisif vers l'adoption de bonnes pratiques de fertilisation et de gestion durable de la fertilité des sols cultivés. Les activités menées ont permis de mieux comprendre le fonctionnement du biochar-SRF dans

deux systèmes différents dominés par une rotation coton-maïs à l'Ouest et à base de *zai* dans le Centre du pays, et son efficacité sur la productivité de trois cultures majeures (coton, maïs et sorgho). Les résultats montrent clairement que l'introduction du biochar dans nos pratiques agricoles pourrait être un départ pour une gestion durable des terres. Par conséquent nous suggérons :

- aux producteurs, d'intégrer l'application du biochar-SRF dans leurs pratiques culturales pour améliorer le rendement du maïs avec des doses modérées ;
- aux structures de développement, d'accompagner la vulgarisation du biochar-SRF à travers l'encadrement des producteurs, la mise en place des champs écoles, des vitrines etc. ;
- à l'Etat, de mettre en œuvre des initiatives d'accompagnement pour l'acquisition de fours à pyrolyse, l'appui technique des agents de vulgarisation, et d'intégrer la promotion du biochar dans les politiques agricoles etc.

La perspective d'une vulgarisation à grande échelle du biochar-SRF et les mécanismes d'accompagnement, pourraient s'adosser sur le disponible de biomasses mobilisables et sur un système de four à pyrolyse intégré, permettant d'une part de mobiliser l'énergie provenant de production biochar pour la cuisson des aliments, et d'autre part de produire du biochar pour amender les sols, et en particulier comme outil de circularité des nutriments. C'est pourquoi, au vu des résultats obtenus et des questions restées sans réponses, des travaux devraient être poursuivis sur les axes suivants :

Axe 1 : approfondir les connaissances sur le biochar et le biochar-SRF, afin d'améliorer son efficacité par l'optimisation des techniques de production, du processus et des modalités d'activation du biochar à travers les actions suivantes :

- tester la lixiviation des nutriments en colonne de sols amendés par le biochar-SRF, afin de mieux étudier le processus de relargage des nutriments ;
- caractériser le processus d'activation avec la gomme arabique, pour maîtriser les pertes notamment celles qui s'opèrent au cours du séchage ;
- poursuivre des expériences sur l'optimisation de la production du biochar-SRF, en utilisant les engrais simples pour mieux quantifier le taux d'adsorption/désorption réel de chaque élément ;
- évaluer d'autres processus d'activation du biochar, afin de maximiser son effet de libération lente ;
- effectuer des essais en pots pour mieux comprendre et coordonner les apports en nutriments en fonction des stades développements ;
- évaluer les doses optimales de biochar (taux d'application et fréquence) en fonction des résidus de biomasse disponible.

Axe 2 : poursuite les travaux pour affiner les évaluations agronomiques de l'efficacité du biochar-SRF au champ à court et à long termes sur différentes cultures. Pour ce faire :

- mettre en place un essai longue durée sur la technologie du biochar-SRF associée à la microdose, afin de déceler les effets complémentaires et d'évaluer leurs effets sur les sols ;
- tester avec les vulgarisateurs, le biochar-SRF dans les champs écoles paysans ;
- comparer l'efficacité du biochar-SRF avec d'autres types d'engrais à libération lente disponibles localement, comme le Burkina phosphate et le Di-Ammonium Phosphate (DAP) ;
- poursuivre l'étude comparative entre le biochar-SRF et le SRF enrobé avec un taux élevé de gomme arabique et des doses croissantes de NPK, afin d'identifier la dose optimale pour le cotonnier ;
- évaluer les aspects socio-économiques et les défis, afin de s'assurer de l'adoption de la technologie par les petits producteurs ;
- tester l'effet de l'activation du biochar avec la gomme arabique dans le *zai*.

5.5. 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>
- Amonmide, I., Dagbenonbakin, G., & Akponikpe, C. E. A. P. (2019). Contribution à l' évaluation du niveau de fertilité des sols dans les systèmes de culture à base du coton au Bénin Contribution to soil fertility level assessment in cotton-based cropping systems in Benin. 13(June), 1846–1860.
- Angsh, E. T., & Sohi, P. S. (2013). Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *GCB Bioenergy*, 5, 221–226. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12023>
- Arbelaez Breton, L., Mahdi, Z., Pratt, C., & El Hanandeh, A. (2021). Modification of hardwood derived biochar to improve phosphorus adsorption. *Environments - MDPI*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/environments8050041>
- Aune, J. B. (2020). Farmers' Soil Fertility Management in Niger and Opportunities for Improvements Through Mechanization, Microdosing, and. *November*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.570561>
- Bandaogo, A., Fofana, B., Youl, S., Safo, E., Abaidoo, R., & Andrews, O. (2014). Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100/2. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9653-6>
- Bielders, C. L., & Gérard, B. (2015). Field Crops Research Millet response to microdose fertilization in south – western Niger : Effect of antecedent fertility management and environmental factors. *Field Crops Research*, 171, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.008>
- Bonzi, M., Lompo, F., Kiba, D. I., & Sédogo, Michel Papaoba. (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).
- 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>
- 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>
- Cui, X. M. (2007). *Soil testing and fertilizer recommendation in fertilizer application of corn*. *Tech Advis*(Anim Husb 8:25 (in Chinese)).
- Dong, D., Wang, C., Van Zwieten, L., Wang, H., Jiang, P., Zhou, M., & Wu, W. (2019). An effective biochar-based slow-release fertilizer for reducing nitrogen loss in paddy fields. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02401-8>
- Duhan, J. S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., Nehra, K., & Duhan, S. (2017). Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology*

- Reports*, 15(December 2016), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.03.002>
- Guan, Y., Song, C., Gan, Y., & Li, F. M. (2014). Increased maize yield using slow-release attapulgite-coated fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(3), 657–665. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0193-2>
- 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>
- Haider, G., Steffens, D., Moser, G., Müller, C., & Kammann, C. I. (2017). Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.019>
- Ibrahim, A., Abaidoo, R. C., Fatondji, D., & Opoku, A. (2016). Determinants of fertilizer microdosing-induced yield increment of pearl millet on an acid sandy soil. *Experimental Agriculture*, 52(4), 562–578. <https://doi.org/10.1017/S0014479715000241>
- Koulibaly, B., Dakuo, D., Traore, M., Traore, O., Nacro, H. B., Lompo, F., & Sedogo, M. P. (2016). Effets de la fertilisation potassique des sols ferrugineux tropicaux sur la nutrition minérale et la productivité du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(2), 722. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i2.22>
- Lehmann, Johannes Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management* (J. L. and S. Joseph. (ed.)). Earthscan.
- Manzoor, S., Habib-ur-Rahman, M., Haider, G., Ghafoor, I., Ahmad, S., Afzal, M., Nawaz, F., Iqbal, R., Yasin, M., Tanveer-ul-Haq, Danish, S., & Ghaffar, A. (2022). Biochar and slow-releasing nitrogen fertilizers improved growth, nitrogen use, yield, and fiber quality of cotton under arid climatic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16576-6>
- Olmo, M., Lozano, A. M., Barrón, V., & Villar, R. (2016). Spatial heterogeneity of soil biochar content affects soil quality and wheat growth and yield. *Science of the Total Environment*, 562, 690–700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.089>
- Ouedraogo, Y., Taonda, J. S., Idriss, S., Tychon, B., & Biielders, C. L. (2020). *Factors driving cereal response to fertilizer microdosing in sub-Saharan Africa: A meta-analysis*. July 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1002/agj2.20229>
- 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.
- Saba, F., Taonda, S. J. B., Serme, I., Bandaogo, A. A., Sourwema, A. P., & Kabre, A. (2017). Effets de la microdose sur la production du niébé, du mil et du sorgho en fonction la toposéquence Effects of fertilizer microdosing on cowpea, millet and sorghum production as a function of the toposequence. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 11(5), 2082–2092. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.12>
- Sahai, P., Bhushan Sinha, V., & Dutta, R. (2019). Bioformulation and

- Nanotechnology in Pesticide and Fertilizer Delivery System for Eco-Friendly Agriculture: A Review. *Acta Scientific Agriculture*, 3(11), 02–10. <https://doi.org/10.31080/asag.2019.03.0675>
- Sanogo, M., Gaspard, F., Kabore, D., & Taonda, S. J. (2020). *The determinants of fertilizer microdosing adoption and impact on sorghum and maize yields in Burkina Faso*. 11(6), 114–122. <https://doi.org/10.7176/JESD/11-6-13>
- Sime, G., & Aune, J. B. (2014). Maize response to fertilizer dosing at three sites in the central rift valley of ethiopia. *Agronomy*, 4(3), 436–451. <https://doi.org/10.3390/agronomy4030436>
- Sun, Z., Sanger, A., Rebensburg, P., Lentzsch, P., Wirth, S., Kaupenjohann, M., & Meyer-Aurich, A. (2017). Contrasting effects of biochar on N₂O emission and N uptake at different N fertilizer levels on a temperate sandy loam. *Science of the Total Environment*, 578, 557–565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.230>
- Tabo, R., Bationo, A., Amadou, B., Marchal, D., Lompo, F., Gandah, M., Hassane, O., Diallo, M. K., Ndjeunga, J., Fatondji, D., Gerard, B., Sogodogo, D., Taonda, J. S., Sako, K., Boubacar, S., Abdou, A., & Koala, S. (2011). Innovations as Key to the Green Revolution in Africa. *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa*. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2>
- Tovihoudji, P. G., Akponikpè, P. B. I., Agbossou, E. K., Bertin, P., & Biielders, C. L. (2017). Fertilizer microdosing enhances maize yields but may exacerbate nutrient mining in maize cropping systems in northern Benin. *Field Crops Research*, 213(March), 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.003>
- 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>
- Wang, S., Li, X., Lu, J., Hong, J., Chen, G., Xue, X., Li, J., Wei, Y., Zou, J., & Liu, G. (2013). *Effects of controlled-release urea application on the growth , yield and nitrogen recovery efficiency of cotton*. 4(12), 33–38.
- Wen, P., Wu, Z., Han, Y., Cravotto, G., Wang, J., & Ye, B. C. (2017). Microwave-Assisted Synthesis of a Novel Biochar-Based Slow-Release Nitrogen Fertilizer with Enhanced Water-Retention Capacity. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(8), 7374–7382. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01721>
- Yao, Y., Gao, B., Chen, J., & Yang, L. (2013). Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: Mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. *Environmental Science and Technology*, 47(15), 8700–8708. <https://doi.org/10.1021/es4012977>
- Yi, M., & Chen, Y. (2018). Enhanced phosphate adsorption on Ca-Mg-loaded biochar derived from tobacco stems. *Water Science and Technology*, 78(11), 2427–2436. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.001>

Annexes

Annexe

Annexe 1 : Concentration en nutriments dans les grains de maïs de l'essai de Farako-Bâ

Traitements	N-total	P-total (mg/100g)	K-total (mg/100g)	Ca-total (mg/100g)	Mg-total (mg/100g)	C (g.kg)	Na
T0	1,74 ^a ±0,1	434 ^a ±17	509 ^a ±18	9a ±0,31	167 ^b ±6	47ab ±0,22	1,44 ^{ab} ±0,9
T1	1,72 ^{ab} ±0,1	457 ^a ±47	530 ^a ±16	8,2a±0,40	189 ^a ±12	47,1a ±0,3	0,8 ^b ±0,54
T2	1,73 ^{ab} ±0,1	464 ^a ±13	507 ^a ±19	9a±1,1	185 ^{ab} ±15	47,2a ±0,19	0,8 ^b ±0,51
T3	1,55 ^b ±0,1	466 ^a ±26	488 ^a ±14	8,1a±0,24	175 ^{ab} ±9	47ab±0,14	3 ^a ±0,1
T4	1,62 ^{ab} ±0,1	474 ^a ±25	519 ^a ±41	9a±0,30	179 ^b ±5,5	47ab±0,3	1,1 ^{ab} ±0,9

Annexe 2 : Rendement moyen interannuel du sorgho du site de Yilou en fonction des traitements

	Traitements	Rendement grain (kg.ha ⁻¹)	Rendement tige (kg.ha ⁻¹)
Saison 2019	Pratique paysanne	926 ^c ± 285	2220 ^a ± 1629
	Biochar grande-dose	1830 ^b ± 267	4647 ^a ± 1640
	Microdose	1539 ^{ab} ± 548	4470 ^a ± 2875
	Biochar-SRF	1699 ^{ab} ± 687	4091 ^a ± 2512
	Biochar petite-dose	1403 ^{ab} ± 206	4143 ^a ± 1466
	Dose vulgarisée	1547 ^{ab} ± 319	3554 ^a ± 1955
Saison 2020	Pratique paysanne	1074 ^{ac} ± 595	2444 ^a ± 1509
	Biochar grande dose	1934 ^a ± 418	4965 ^a ± 878
	Microdose	1549 ^{ab} ± 327	3916 ^a ± 1549
	Biochar-SRF	1986 ^a ± 391	4257 ^a ± 1676
	Biochar petite dose	1735 ^{ab} ± 350	4478 ^a ± 1333
	Dose vulgarisée	1566 ^{ab} ± 551	3431 ^a ± 981



Annexe 3 : Description de fosse pédologique sur le site de Yilou



Annexe 4 : Tamisage de grumeau de gomme d'*Acacia senegal*



Annexe 5 : Essai en pot de l'étude comparative du biochar activé avec trois niveaux de NPK



Annexe 6 : Session de formation des producteurs/trices du site de Yilou sur la production de biochar sur (Cliché F. Saba. 2019)



Annexe 7 : Etape de caractérisation physico-chimique du biochar au laboratoire



Annexe 8 : Parcelles de sorgho et de coton au stade montaison



Annexe 9 : Récolte de sorgho à Yilou en 2020



Annexe 10 : Mesure de l'humidité du sol

Annexe 11 : Titres des mémoires encadrés dans la thèse

Titre du mémoire	Auteurs	Niveau d'étude
Effets du biochar sur la performance de la fertilisation microdose et le rendement du maïs	Coulibaly Bintou	Licence professionnelle IPA
Efficacité des modes d'activation du biochar sur la croissance du maïs	Kafando Iliasse	Stage de 45 jours cycle ingénieur d'agriculture CAP Marourkou
Effets de l'apport du biochar-SRF sur les paramètres de rendements du maïs et l'efficacité des nutriments	Sylla Cheick Oumar	Licence professionnelle IPA
Evaluation des effets du biochar activé (SRF) sur les paramètres chimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé et sur les rendements du cotonnier (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) dans la zone Ouest du Burkina Faso	Bacia IK Rabiatou	Master IDR
Etude sous technique zaï des effets du biochar et de la fertilisation microdose sur les propriétés chimiques d'un sol ferrugineux tropical et les rendements du sorgho (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench) dans le village de Yilou (Burkina Faso).	Abdou- Kadré Ouedraogo	Ingéniorat IDR

Annexe 12 : Publications et résumés de conférences**A) Publications**

Saba F., Sawadogo H., Cornelis J-T., Ouedraogo A-K., Cisse D., Coulibaly K., Nacro H-B. (2022). Gestion efficace des nutriments par l'utilisation de biochar et compost dans un système zaï au Centre-nord du Burkina Faso. *Agronomie Africaine* 34 (1), 1-14.

Saba F., Cornelis J-T., Sawadogo H., Lefebvre D., Bacia, R. K. I., Cisse D., Bandaogo, A. A., Mamadou, T., & Nacro, H.-B. (2023). Nutrient-charged biochars increased nutrient-use efficiency in a cotton–maize rotation in Burkina Faso. *Agronomy Journal*, 1–18.

<https://doi.org/10.1002/agj2.21283>

Traoré A, Bandaogo AA, Savadogo OM, **Saba F.**, Ouédraogo AL, Sako Y, Sermé I and Ouédraogo S (2022). Optimizing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growth with different combinations of Organo-Mineral Fertilizers. *Front. Sustain. Food Syst.* 5:694628. doi: 10.3389/fsufs.2021.694628

B) Résumés de conférences

Saba F., Cornelis J-T., Sawadogo H., Cisse D., Nacro H-B (2020). Production of Slow-Release Fertilizer based on cotton stems biochar and NPK: a sustainable fertilization alternative. Poster at the 25th National Symposium for Applied Biological Sciences (NSABS)- Gembloux-Belgique.

Saba F., Sawadogo H., Cisse D., Traore M., Coulibaly K., Cornelis J-T., Nacro B-H. (2022). Microdosage des engrais à base de biochar pour une production durable du maïs dans la zone ouest du Burkina Faso. Poster 10^{ème} édition des doctoriales Institut 2ie.

Saba F., Sawadogo H., Cornelis J-T., Ouedraogo A-K., Cisse D., Coulibaly K., Nacro H-B. (2021). Effets des fertilisants à libération lente à base de biochar de tiges de cotonnier sur les rendements du sorgho au Burkina Faso. Poster 25^{ème} édition du FRSIT 26-30 octobre 2021 Ouagadougou Burkina Faso.

Saba F., Sawadogo H., Cornelis J-T., Nacro H-B (2021). Du "slow release fertilizer" à base du biochar : une alternative durable de restauration de la productivité des terres dégradées sous climat semi-aride du Burkina Faso. Communication orale 3^{ème} Symposium scientifique international sur la gestion durable des terres, Ouagadougou, 17-21 mai 2021.

Saba F., Cornelis J-T., Sawadogo H., Cisse D., Nacro H-B (2019). Production et optimisation d'un "Slow Release Fertilizer" à base de biochar de tiges de cotonnier et du NPK. Poster conférence sur l'intensification durable, Hotel Ngor Diarama, Dakar, Sénégal, 8-10 octobre 2019

Saba F., Cornelis J-T., Nacro H-B. (2019). Etude des effets combinés du biochar et de la fertilisation microdose sur les propriétés agro-pédologiques des zones ouest et centre -nord. Communication orale CS DpASAP 29 octobre au 1 novembre 2019 Eau Vive Bobo-Dioulasso, Burkina Faso