

1 **L'application de phospho-composts au biochar améliore la disponibilité des nutriments**
2 **d'un sol sous cultures irriguées en climat tropical au Burkina Faso**

3 **Résumé**

4 Les amendements organiques de qualité sont nécessaires pour améliorer les caractéristiques
5 des sols tropicaux et intensifier la production agricole. Cette étude, menée à l'Ouest du
6 Burkina Faso, visait à déterminer l'effet de différents phospho-composts au biochar sur le pH,
7 la capacité d'échange cationique (CEC), le phosphore total et assimilable et le potassium total
8 et disponible du sol dans un environnement irrigué. Pour ce faire, un dispositif en blocs de
9 Fisher comportant dix traitements, répartis aléatoirement en quatre répétitions, a été mis en
10 place dans la plaine irriguée de Bama (province du Houet) et suivi pendant deux campagnes
11 successives : le riz en saison pluvieuse de 2023 et le maïs en saison sèche de 2024. Les dix
12 traitements ont été élaborés à partir de fumure minérale vulgarisée (FMV), de phospho-
13 composts de pailles de riz sans le biochar (Pcom) et avec le biochar (PcomBio), ainsi que de
14 résidus de fruits et légumes sans le biochar (PcomFL) et avec le biochar (PcomFLBio).
15 Globalement, la CEC des sols amendés aux phospho-composts avec ou sans biochar a été
16 significativement ($P < 0,001$) améliorée par rapport à celle du témoin absolu. Le traitement
17 PcomFLBio combiné à 100% de FMV (PcomFLBio-100) a amélioré le pH-KCl et les teneurs
18 en phosphore total, phosphore assimilable et potassium disponible, respectivement de 6,72%,
19 41,97%, 288% et 42,73% par rapport au témoin absolu. Le potassium total a significativement
20 ($P = 0,002$) été amélioré par les PcomBio-100 et PcomFLBio-100 par rapport aux autres
21 traitements. On peut retenir que l'addition de phosphate naturel et de biochar au compost de
22 pailles de riz et de résidus de fruits et légumes permet d'améliorer les caractéristiques
23 chimiques des sols sous irrigation et d'assurer une production agricole durable.

24 **Mots clés** : plaine irriguée, fertilisants organiques, déficit nutritionnel, Burkina Faso

25 **Abstract**

26 High-quality organic soil amendments are essential for improving the properties of tropical
27 soils and enhancing agricultural production. The objective of this study, conducted in western
28 Burkina Faso, was to assess the effect of different biochar phospho-composts on soil pH,
29 cation exchange capacity (CEC), total and assimilable phosphorus, as well as total and
30 available potassium in an irrigated environment. A Fisher block design with ten treatments,
31 randomly assigned into four replications, was set up on the irrigated plain of Bama (Houet
32 Province) and monitored across two consecutive seasons: rice in the 2023 rainy season and

33 maize in the 2024 dry season. The ten treatments consisted of mineral fertiliser (FMV), rice
34 straw phospho-composts without biochar (Pcom) and with biochar (PcomBio), and fruit and
35 vegetable residues-based phospho-composts without biochar (PcomFL) and with biochar
36 (PcomFLBio). Overall, the CEC of soils amended with phospho-composts, both with or and
37 without biochar, was significantly ($P < 0.001$) improved compared to the control treatment.
38 The PcomFLBio treatment combined with 100% of mineral fertilizer (PcomFLBio-100),
39 enhanced pH-KCl and total phosphorus, assimilable phosphorus and available potassium by
40 6.72%, 41.97%, 288% and 42.73% respectively compared to the absolute control.
41 Additionally, total potassium was significantly ($P = 0.002$) improved by PcomBio-100 and
42 PcomFLBio-100 compared to the other treatments. The addition of rock phosphate and
43 biochar in rice straw and fruit and vegetable residues composts improves the chemical
44 properties of irrigated soils and ensures sustainable agricultural production.

45 **Keywords** : irrigated plain, organic fertiliser, nutrient deficiency, Burkina Faso

46 **Introduction**

47 Dans de nombreux pays, des études récentes ont évoqué la baisse progressive de la fertilité
48 des sols des agrosystèmes irrigués (Yu et al., 2019 ; Suriyagoda, 2022), parfois créée par
49 l'irrigation excessive (Yr et al., 2022). En effet, l'irrigation excessive engendre de
50 nombreuses pertes de quelques nutriments par lessivage avec pour conséquence, leurs
51 carences dans le sol et la réduction de la croissance des cultures (Yr et al., 2022).

52 Au Burkina Faso, des travaux antérieurs ont souligné la carence en azote et phosphore avec
53 une faible minéralisation de la matière organique (Segda et al., 2013 ; Epolyste et al., 2015) et
54 une tendance à l'acidification (Segda et al., 2014; Yaméogo et al., 2021). Aussi, leur capacité
55 d'échange cationique (CEC) est très faible avec une toxicité ferreuse élevée (Bikienga, 2001).
56 La déficience du sol en nutriments majeurs a été identifiée comme l'un des facteurs les plus
57 limitants de la production rizicole (Ibrahim et al., 2021). De plus, la biodisponibilité des
58 nutriments y est souvent limitée du fait de l'acidité et du déficit organique des sols (Yaméogo
59 et al., 2020a)

60 Dans ces conditions édaphiques, la majorité des producteurs font recours principalement aux
61 engrais chimiques contre une minorité qui utilise les amendements organiques (Bazin, 2017;
62 Kambou, 2019; Ouédraogo et al., 2022a). L'utilisation intensive des engrais provoque
63 l'acidification des sols (Bazin, 2017) surtout lorsqu'elle est faite dans des conditions
64 d'irrigation conventionnelle (Yaméogo et al., 2021) ; ce qui limite la biodisponibilité des

65 nutriments (Yaméogo et al., 2020) et crée continuellement leur carence nécessitant à nouveau
66 un apport d'éléments pour assurer la production agricole. Ainsi, les sols sont entretenus dans
67 un cercle vicieux dans lequel ils peinent à satisfaire les besoins nutritionnels des cultures à
68 court terme. Les voies d'amélioration doivent alors favoriser une diminution des pertes de
69 nutriments et améliorer leur rétention tout en minimisant les effets défavorables des engrais
70 chimiques. Etant donné les moyens financiers limités de la plupart des producteurs pour
71 combler les besoins des cultures à travers les apports de nutriments (Bazin, 2017; Suriyagoda,
72 2022), le retour au sol des résidus de récolte sous forme d'amendements organiques doit être
73 encouragé. En effet, les effets de ces amendements sont divers et sont visibles à travers
74 l'amélioration de la capacité d'échanges de cations (CEC) et des teneurs en carbone
75 organique, azote, phosphore et potassium (Mahmood et al., 2017 ; Bacyé et al., 2021). Le
76 retour au sol de ces résidus peut également se faire sous forme de co-compost au biochar pour
77 améliorer la réponse des sols aux besoins des cultures (Wang et al., 2019 ; Cissé et al., 2021;
78 Gao et al., 2023). Le co-compost réduit significativement les pertes de nutriments
79 comparativement à l'application du compost seul (Gao et al., 2023). Les amendements
80 organiques de qualités sont alors nécessaires pour apporter une réponse adéquate au problème
81 de disponibilité des nutriments dans le sol sous irrigation notamment de l'azote (N), du
82 phosphore (P) et du potassium (K) qui jouent un rôle très essentiel dans la productivité des
83 cultures (Ouédraogo et al., 2022b). Par ailleurs, les résultats de Compaoré et Nanéma (2010)
84 révèlent que les phospho-composts à base de déchets organiques et de phosphate naturel
85 présentent des caractéristiques intéressantes pouvant améliorer la fertilité des sols. Cette étude
86 visait à déterminer les effets de différents phospho-composts au biochar sur le pH, la CEC et
87 les teneurs en carbone, azote, phosphore et potassium totaux ainsi que sur celles du phosphore
88 et potassium biodisponibles dans le sol sous cultures irriguées.

89 **Matériel et méthodes**

90 **Description du site d'étude**

91 L'étude a été conduite dans la plaine irriguée de la Vallée du Kou à Bama (04°25'37''
92 longitude Ouest et 11°23'48'' latitude Nord), l'une des communes rurales de Bobo-Dioulasso
93 située à l'Ouest du Burkina Faso (Figure 1). Cette commune, caractérisée par un important
94 réseau hydrologique dont le Kou, appartient au climat du type sud soudanien caractérisé par
95 une alternance entre une saison sèche de sept mois et une saison humide de cinq mois (Fontes
96 et Guinko, 1995). La pluviosité moyenne annuelle des dix dernières années (2013-2022) est
97 comprise entre 780 et 1300 mm par an (données de la Station météorologique de

98 Bama/ANAM, 2024). Au cours de cette étude menée d’août 2023 à mai 2024, le mois d’août
 99 était le mois le plus pluvieux (303,9 mm) suivi du mois de septembre (173,8 mm).

100 Les sols prédominants du site d’étude sont les gleysols avec la présence de quelques lixisols
 101 (BUNASOLS, 2002).

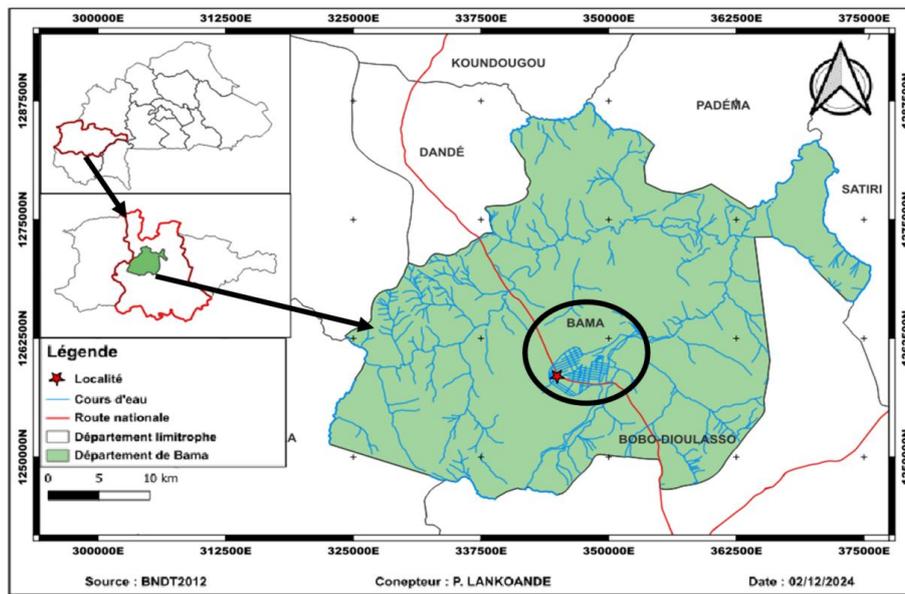


Figure 1: site de l’étude

102 **Matériel**

103 Le matériel végétal utilisé pour la conduite de l’étude était constitué de la variété TS2 du riz
 104 (*Orizae sativa*) et de la variété Espoir du maïs (*Zea mays L.*). La variété TS2 a un cycle de
 105 120 jours et un rendement potentiel de 6,5 t.ha⁻¹ tandis que le cycle de la variété Espoir varie
 106 entre 95 et 110 jours avec pour rendement potentiel de 6,5 t.ha⁻¹ (Comité National des
 107 Semences (CNS), 2014). Les semences de ces cultures ont été achetées à NAFASO.

108 Les fertilisants organiques étaient composés de quatre types de phospho-composts produits
 109 par un compostage d’un mélange de pailles de riz, de phosphates naturels et du fumier
 110 d’étable (Pcom) et avec un ajout du biochar (PcomBio), et d’un mélange pailles de riz et
 111 résidus de fruits et légumes, de phosphates naturels et du fumier d’étable (PcomFL) avec ajout
 112 du biochar (PcomFLBio). Leurs caractéristiques chimiques sont consignées dans le tableau 1.

113 Les fertilisants chimiques étaient composés d’engrais minéraux tels que le complexe NPK
 114 (16-16-16) et l’urée (46 % N) achetés sur le marché à Bama.

115 **Tableau 1** : caractéristiques des fertilisants organiques utilisés pour l’étude

FO	pH-eau	COT (%)	N-t (%)	C/N	P-t (mg.kg ⁻¹)	K-t (mg.kg ⁻¹)
Pcom	8,51 ± 0,03	25,8 ± 0,67	1,33 ± 0,02	19 ± 0,36	7079 ± 16,7	19159 ± 366,5
PcomFL	8,07 ± 0,07	29,1 ± 0,95	1,80 ± 0,05	16 ± 0,18	6841 ± 10,3	18008 ± 356,1

PcomBio	8,29 ± 0,19	31,7 ± 1,40	1,82 ± 0,01	17 ± 0,73	5489 ± 66,3	19235 ± 409,0
PcomFLBio	8,10 ± 0,01	31,6 ± 0,82	2,09 ± 0,14	15 ± 0,88	5456 ± 56,1	18211 ± 726,8

116 **Légende** : FO : fertilisants organiques ; COT. : carbone organique total ; N-t : azote total ; P-t : phosphore
 117 total ; K-t : potassium total ; Pcom : 75 % de biomasses à base de pailles de riz exclusives + 25 % de fumier
 118 d'étable + 2 % du burkina phosphate ; PcomFL : 75 % de biomasse à base de pailles de riz (2/3) et résidus de
 119 fruits et légumes (1/3) + 25 % de fumier d'étable + 2 % du burkina phosphate ; PcomBio : Pcom + 20 % de
 120 biochar et PcomFLBio : PcomFL + 20 % de biochar.

121 Méthodologie

122 Dispositif expérimental

123 Les traitements comparés étaient au nombre de dix (Tableau 2) et le plan d'expérimentation
 124 était un dispositif de Fischer avec quatre répétitions (Figure 2). La superficie de chaque
 125 parcelle élémentaire était de 20 m². Le type de fertilisation (traitement) est le facteur principal
 126 étudié et les facteurs secondaires, la campagne de mise en culture et la profondeur de
 127 prélèvements des échantillons.

128 **Tableau 2** : composition des traitements comparés

Traitements	Type de FO	Dose FO (t.ha ⁻¹)	Dose NPK (kg.ha ⁻¹)	Dose Urée (kg.ha ⁻¹)
Témoin	-	0	0	0
FMV	-	0	200	150
Pcom-50	Pcom	12	100	75
PcomFL-50	PcomFL	12	100	75
PcomBio-50	PcomBio	12	100	75
PcomFLBio-50	PcomFLBio	12	100	75
Pcom-100	Pcom	12	200	150
PcomFL-100	PcomFL	12	200	150
PcomBio-100	PcomBio	12	200	150
PcomFLBio-100	PcomFLBio	12	200	150

129 **Légende** : FO : fumure organique ; FMV : fumure minérale vulgarisée dans les plaines irriguées ; Pcom :
 130 phospho-composts de pailles de riz ; PcomFL : phospho-composts de pailles de riz et résidus de fruits et
 131 légumes ; PcomBio : phospho-composts de pailles de riz enrichis à 20 % de biochar de balles de riz ;
 132 PcomFLBio : phospho-composts de pailles de riz et résidus de fruits et légumes enrichis à 20 % de biochar de
 133 balles de riz.

134 **Conduite de l'essai**

135 L'essai a été mis en place sur la période d'août 2023 à mai 2024 en deux campagnes
136 successives sur les mêmes parcelles du dispositif expérimental. La période de l'essai
137 correspondait à la saison hivernale 2023 (culture du riz) et la saison sèche 2024 (culture du
138 maïs). Un labour à plat et à traction animale dans la profondeur 0-20 cm du sol a été effectué
139 pendant chaque campagne. Après la récolte du riz, les résidus organiques ont été exportés
140 avant le labour pour la deuxième campagne. Les différents phospho-composts ont été enfouis
141 dans les parcelles labourées uniquement en première campagne en raison de 12 t.ha^{-1} sauf
142 dans celles du témoin absolu et de la FMV. L'opération de mise en boue s'en était suivie
143 avant le repiquage des plants de riz en raison d'un plant par poquet avec un écartement de
144 0,25 m entre les lignes et entre les poquets. Le NPK a été apporté au repiquage dans les
145 parcelles selon les doses par traitement. L'urée a été apportée en deux fractions, soit 35 % des
146 quantités à 20 jours après épandage (JAE) et 65 % en début d'initiation paniculaire (55 JAE).
147 La récolte du riz a été faite au 115^{ème} JAE puis, un mois après, un labour à plat suivi du
148 concassage a été fait pour la deuxième campagne avec l'installation du maïs. Aucun apport
149 organique ni minérale n'a été opéré pendant cette campagne. L'irrigation d'appoint a été faite
150 pendant les poches de sécheresse rencontrées au cours de la première campagne tandis que le
151 maïs, mis en place en deuxième campagne (saison sèche) a été irrigué chaque deux jours
152 durant son cycle de développement. Le système d'irrigation gravitaire a été utilisé quelle que
153 soit la campagne considérée.

154 **Collecte des données**

155 Avant le labour du sol, des fosses pédologiques ont été ouvertes pour la description du site
156 d'étude. Au total, quatre fosses ont été décrites et des échantillons de sol ont été prélevés dans
157 les différents horizons des profils décrits. Ensuite, après la récolte de chaque campagne, des
158 échantillons de sol ont également été prélevés dans les profondeurs 0-20 cm et 20-40 cm du
159 sol. La texture du sol au cours de la description des fosses pédologiques a été faite à travers
160 les échantillons prélevés dans chaque horizon du profil à travers la méthode densimétrique.
161 L'ensemble des échantillons de sol prélevés pendant la description des fosses pédologiques et
162 après les récoltes de chaque campagne ont été séchés à l'ombre au laboratoire et ont été
163 utilisés pour la détermination du pH (Méthode potentiométrique décrite par Rhoades (1982)),
164 de la CEC (méthode de Kjeldahl) du carbone organique (méthode de Walkley et Black
165 (1934), de l'azote total (méthode de Kjeldahl décrite par Hillebrand et al. (1953)), du
166 phosphore total et assimilable (Méthode Bray et Kurtz (1945) et du potassium total et
167 disponible (méthode de méthode photométrique).

168 **Analyse statistique**

169 Les analyses statistiques avec le logiciel R version 4.4.2 et une analyse de variance (ANOVA)
170 à trois facteurs, ont été réalisées afin de déterminer l'effet du type de fertilisation (facteur
171 principal), la variation entre les profondeurs et les campagnes de mise en culture sur les
172 paramètres du sol étudiés. Le test de Fischer a permis de faire la séparation des moyennes
173 lorsque l'ANOVA a révélé des différences significatives entre les modalités au seuil de
174 probabilité de 5 %. Ce logiciel a été également utilisé pour une régression multiple entre les
175 paramètres du sol.

176 **Résultats**

177 **Caractéristiques du sol du site d'expérimentation**

178 Les caractéristiques du sol du site d'étude sont consignées dans le tableau 3. En général, c'est
179 un sol peu profond (0-27 cm pour le profil 1, 0-30 cm pour le profil 2 et 0-57 cm pour le
180 profil 3) à moyennement profond (0-78 cm pour le profil 4) avec une texture sablo-limoneuse
181 dans les horizons superficiels à sablo-argilo-limoneuse en profondeur. Le pH, les teneurs en
182 COS, N, P et K et la CEC ont varié d'un profil à l'autre. Les valeurs numériques du pH-eau,
183 pH-KCl et des teneurs en COS, en éléments totaux comme le N et le P sont plus élevées dans
184 les horizons superficiels par rapport aux horizons sous-jacents quel que soit le profil considéré
185 tandis que le contraire est observé pour celles du K total et la CEC.

Tableau 3 : caractéristiques physico-chimiques du sol du site d'expérimentation

Paramètres	Profil 1		Profil 2		Profil 3		Profil 4	
	0-23 cm	23-27 cm	0-16 cm	16-30 cm	0-23 cm	23-57 cm	0-34 cm	34-78 cm
Texture	SL	SL	SAL	SAL	SL	SAL	SL	SAL
pH _{eau}	6,2	5,92	6,21	5,85	6,09	5,98	6,25	6
pH _{KCl}	4,79	4,64	4,95	4,88	4,72	4,51	4,79	4,72
C-org. (%)	0,65	0,47	1,08	0,5	0,9	0,73	0,89	0,44
N-total (%)	0,11	0,07	0,09	0,06	0,06	0,04	0,14	0,07
C/N	6	7	11	8	15	18	6	6
P _{-total} (mg/kg de sol)	370	220	318	243	316	227	316	229
P _{-ass} (mg/kg de sol)	2,91	2,02	2,66	0,81	3,39	1,94	1,86	1,45
K _{-total} (mg/kg de sol)	2439	2642	2638	3222	2347	2539	2245	2637
K-disp (mg/kg de sol)	116	90,8	94,71	124	101	98,7	80,9	88,8
CEC (cmolc kg ⁻¹)	4,29	4,67	5,09	4,69	5,59	6,22	5,80	5,93

Légende : SL : sablo-limoneux ; SAL : sablo-argilo-limoneux ; C : carbone ; N : azote ; P-ass : Phosphore assimilable ; K-disp : potassium disponible ; CEC : Capacité d'échange cationique

Variation des teneurs en carbonique, en azote, phosphore et potassium totaux du sol en fonction de la fertilisation, la profondeur du sol et la campagne de mise en culture

Le tableau 4 présente la variation des teneurs en carbone organique du sol (COS), N, P et K et le C/N du sol en fonction de la fertilisation, de la profondeur de prélèvement du sol et de la campagne de mise en culture. Il ressort de ce tableau que seules les teneurs en P et K total ont significativement varié entre les différents traitements. Les teneurs en P total et K total significativement plus élevées ont été enregistrés respectivement avec le traitement PcomFLBio-100 (438 mg/kg de sol) et le PcomBio-100 (1653 mg/kg de sol) tandis que les plus faibles ont été obtenues avec le témoin absolu (308 et 1306 mg/kg de sol, respectivement pour le P et le K total). En considérant le facteur profondeur du sol, les résultats montrent que les teneurs en COS, en N et P sont statistiquement plus élevés dans la couche 0-20 cm que dans 20-40 cm du sol tandis que celles en K total sont significativement plus élevées dans la couche 20-40 cm du sol. S'agissant du facteur campagne de mise en culture, l'on note une tendance haussière mais non significative du C/N et des teneurs en COS, N total et K total après la récolte du maïs en deuxième campagne et seules celles du P total du sol ont connu une baisse significative ($P < 0,001$).

Les interactions entre les différents facteurs ne sont significatives que pour les teneurs en phosphore ($P < 0,001$) et potassium total ($P < 0,001$) et le rapport C/N ($P = 0,01$). L'interaction entre la profondeur de prélèvement des échantillons du sol et la campagne de mise en culture est significative pour l'ensemble de ces paramètres du sol. Entre la profondeur de prélèvement et la fertilisation, l'interaction n'est significative que pour les teneurs en azote ($P < 0,001$), phosphore total ($P < 0,001$) et potassium total ($P < 0,001$). L'interaction entre la campagne de mise en culture et la fertilisation n'est significative que sur les teneurs en P total ($P = 0,004$) et K total ($P < 0,001$).

Tableau 4 : variation du C/N et des teneurs en COS, en N, P et K totaux

Facteurs	Modalités	COS (%)	Nt (%)	C/N	P-t (mg/kg)	Kt (mg/kg)
Fertilisation (F)	Témoin	1,09 ± 0,08	0,12 ± 0,01	9,35 ± 0,26	308 ^a ± 12,6	1306 ^a ± 86,2
	FMV	1,10 ± 0,09	0,12 ± 0,01	9,22 ± 0,27	349 ^{ab} ± 19,5	1322 ^a ± 70,2
	Pcom-50	1,12 ± 0,10	0,12 ± 0,01	8,62 ± 0,42	359 ^{ab} ± 24,2	1425 ^{ab} ± 89,5
	PcomFL-50	1,12 ± 0,09	0,13 ± 0,01	9,13 ± 0,31	363 ^{ab} ± 25,0	1418 ^{ab} ± 61,9
	PcomBio-50	1,13 ± 0,10	0,12 ± 0,01	9,29 ± 0,22	358 ^{ab} ± 22,9	1363 ^{ab} ± 77,8
	PcomFLBio-50	1,17 ± 0,09	0,13 ± 0,01	9,28 ± 0,17	371 ^{ab} ± 23,1	1495 ^{ab} ± 56,4
	Pcom-100	1,11 ± 0,09	0,12 ± 0,01	8,97 ± 0,19	404 ^{ab} ± 30,0	1464 ^{ab} ± 51,0

	PcomFL-100	1,15 ± 0,08	0,13 ± 0,01	8,85 ± 0,29	410 ^{ab} ± 33,8	1481 ^{ab} ± 47,8
	PcomBio-100	1,20 ± 0,10	0,13 ± 0,01	9,16 ± 0,22	424 ^{ab} ± 39,6	1653 ^b ± 68,7
	PcomFLBio-100	1,22 ± 0,11	0,14 ± 0,01	8,95 ± 0,22	438 ^b ± 40,2	1647 ^b ± 66,6
	Pr(>F)	0,98	0,96	0,66	0,05	0,002
	Significativité				*	**
Profondeur (P)	0-20 cm	1,47 ± 0,01	0,17 ± 0,00	8,75 ± 0,09	467 ± 10,9	1412 ± 35,7
	20-40 cm	0,81 ± 0,02	0,09 ± 0,00	9,42 ± 0,13	290 ± 4,72	1503 ± 28,3
	Pr(>F)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,04
	Significativité	***	***	***	***	*
Campagne de mise en Cultures	CC1-Riz	1,10 ± 0,05	0,12 ± 0,01	9,07 ± 0,12	418 ± 14,2	1449 ± 39,5
	CC2-Maïs	1,19 ± 0,03	0,13 ± 0,00	9,09 ± 0,12	339 ± 9,92	1466 ± 23,8
	Pr(>F)	0,11	0,21	0,88	< 0,001	0,72
	Significativité	NS	NS	NS	THS	NS
P*CC		***	***	***	***	***
F*P			***		***	***
F*C					**	***
F*P*CC				*	***	***

Légende : * : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; COS : Carbone Organique du Sol ; Nt : azote total ; P-t : phosphore total ; K-t : potassium total ; NS : Non significatif ; HS : Hautement significatif ; THS : Très Hautement Significatif ; FMV : fumure minérale vulgarisée ; Pcom-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz (Pcom) + 50% FMV ; PcomFL-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz et résidus de fruits et légumes (PcomFL) + 50% FMV ; PcomBio-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz enrichis au biochar (Pcom-Bio) + 50% FMV ; PcomFLBio-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz et résidus de fruits et légumes enrichis au biochar (PcomFL-Bio) + 50% FMV ; Pcom-100 : 12 t/ha de Pcom + FMV ; PcomFL-100 : 12 t/ha de PcomFL + FMV ; PcomBio-100 : 12 t/ha de Pcom-Bio + FMV et PcomFLBio-100 : 12 t/ha de PcomFL-Bio + FMV. Les valeurs suivies de la même lettre dans la même colonne sont statistiquement identiques.

Variation du pH, de la CEC et des teneurs en P-ass et K-disp du sol en fonction de la fertilisation, la profondeur du sol et la campagne de mise en culture

Le pH (eau et KCl), la CEC et les teneurs en P-ass et K-disp du sol ont varié en fonction de la profondeur de prélèvement du sol, la campagne de mise en culture et la fertilisation (Tableau 5). Les valeurs moyennes de ces paramètres statistiquement plus élevées ont été enregistrées dans la profondeur 0-20 cm du sol exceptée la CEC. Il ressort de ce tableau que le pH-KCl, la CEC et les teneurs en P assimilable et K disponible ont significativement varié entre les différents traitements. Les valeurs moyennes de pH-KCl (4,92) et les teneurs en P-ass (1,94 mg/kg de sol) et K-disp (116,17 mg/kg de sol) significativement plus élevées ont été obtenues avec le traitement PcomFLBio-100 tandis que le PcomFL-100 a enregistré la CEC (7,73 cmolC.kg⁻¹) la plus élevée. Les plus faibles valeurs moyennes de ces paramètres ont été obtenues avec le témoin absolu. La CEC des traitements PcomBio-100, PcomFLBio-100, Pcom-100, PcomBio-50 et PcomFL-50 sont statistiquement identiques à celle du PcomFL-100.

Ces paramètres sont significativement plus élevés dans la couche 0-20 cm du sol que dans 20-40 cm exceptée la CEC qui est identique entre les deux couches. En considérant le facteur campagne de mise en culture, l'on note une tendance significativement haussière du pH-eau, de la CEC et des teneurs en K disponible après la récolte du maïs en deuxième campagne et seules celles du P assimilable du sol ont connu une baisse significative ($P < 0,001$). Les interactions entre les différents facteurs ne se sont révélées significatives que sur les teneurs en P-ass et la CEC du sol. Excepté le pH-KCl, l'interaction entre la profondeur de prélèvement des échantillons du sol et la campagne de mise en culture est significative. Les interactions entre la profondeur de prélèvement la fertilisation et celle entre la campagne de mise en culture et la fertilisation n'est significative que sur les teneurs en P-ass.

Tableau 5 : variation du pH, de la CEC et des teneurs en P-ass et K-disp

Facteurs	Modalités	pH-eau	pH-KCl	P-ass (mg.kg ⁻¹)	K-disp (mg.kg ⁻¹)	CEC (cmolC.kg ⁻¹)
Fertilisation (F)	Témoin	5,85 ± 0,07	4,61 ^a ± 0,07	0,50 ^a ± 0,07	81,4 ^a ± 3,94	5,88 ^a ± 0,28
	FMV	5,97 ± 0,05	4,70 ^{ab} ± 0,06	0,90 ^{ab} ± 0,16	88,9 ^{ab} ± 4,75	6,69 ^{ab} ± 0,22
	Pcom-50	5,97 ± 0,07	4,65 ^{ab} ± 0,05	1,31 ^{ab} ± 0,31	104,7 ^{bc} ± 4,44	6,98 ^{ab} ± 0,32
	PcomFL-50	6,07 ± 0,08	4,77 ^{ab} ± 0,07	1,30 ^{ab} ± 0,31	100,2 ^{ac} ± 5,30	7,46 ^b ± 0,29
	PcomBio-50	6,09 ± 0,06	4,77 ^{ab} ± 0,05	1,18 ^{ab} ± 0,22	95,6 ^{ac} ± 3,88	7,26 ^b ± 0,27
	PcomFLBio-50	6,04 ± 0,07	4,76 ^{ab} ± 0,07	1,62 ^{ab} ± 0,32	103,8 ^{bc} ± 3,75	7,65 ^b ± 0,31
	Pcom-100	6,06 ± 0,09	4,78 ^{ab} ± 0,07	1,39 ^{ab} ± 0,24	109 ^{bc} ± 6,10	7,28 ^b ± 0,21
	PcomFL-100	6,10 ± 0,07	4,86 ^{ab} ± 0,06	1,63 ^{ab} ± 0,34	108,4 ^{bc} ± 5,44	7,73 ^b ± 0,22
	PcomBio-100	6,04 ± 0,06	4,76 ^{ab} ± 0,05	1,61 ^{ab} ± 0,27	108,9 ^{bc} ± 5,40	7,63 ^b ± 0,28
	PcomFLBio-100	6,15 ± 0,06	4,92 ^b ± 0,05	1,94 ^b ± 0,40	116,2 ^c ± 5,68	7,64 ^b ± 0,28
Pr(>F)		0,12	0,023	0,028	< 0,001	< 0,001
Significativité			*	*	***	***
Profondeur (P)	0-20 cm	6,17 ± 0,02	4,86 ± 0,03	2,02 ± 0,14	109,9 ± 2,36	7,29 ± 0,16
	20-40 cm	5,90 ± 0,03	4,65 ± 0,02	0,65 ± 0,03	93,5 ± 18,87	7,15 ± 0,10
	Pr(>F)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,462
Significativité		***	***	***	***	
Campagne de mise en Cultures (CC)	CC1-Riz	5,98 ± 0,03	4,76 ± 0,03	1,71 ± 0,17	97,0 ± 2,03	6,51 ± 0,09
	CC2-Maïs	6,09 ± 0,03	4,76 ± 0,03	0,97 ± 0,05	106,4 ± 2,66	7,93 ± 0,12
	Pr(>F)	0,0131	0,9	< 0,001	0,006	< 0,001
Significativité		*		***	**	***
P*CC		***		***	*	***
F*P				***		
F*CC				***		
F*P*CC				***		**

Légende : * : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif ; CEC : capacité d'échange cationique ; P-ass : phosphore assimilable ; K-dsp : potassium disponible ; FMV : fumure minérale vulgarisée ; Pcom-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz (Pcom) + 50% FMV ; PcomFL-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz et résidus de fruits et légumes (PcomFL) + 50% FMV ; PcomBio-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz enrichis au biochar (Pcom-Bio) + 50% FMV ; PcomFLBio-50 : 12 t/ha de phospho-composts de pailles de riz et résidus de fruits et légumes enrichis au biochar (PcomFL-Bio) + 50% FMV ; Pcom-100 : 12 t/ha de Pcom + FMV ; PcomFL-100 : 12 t/ha de PcomFL + FMV ; PcomBio-100 : 12 t/ha de Pcom-Bio + FMV et PcomFLBio-100 : 12 t/ha de PcomFL-Bio + FMV. Les valeurs suivies de la même lettre dans la même colonne sont statistiquement identiques.

Relation entre les éléments disponibles, la CEC et les autres paramètres du sol

Le tableau 6 présente la relation entre le pH, le COS, la CEC, le P (total et assimilable) et le K (total et disponible). Le modèle indique que le K-dsp est positivement et significativement ($P < 0,001$) corrélé à la CEC, au pH (eau et KCl), et à la teneur en COS et K total du sol. Le coefficient de détermination R^2 du modèle est de 0,5203, ce qui signifie que 52,03 % de la variance de K-dsp est expliquée par ces variables.

S'agissant du P-ass, il est positivement et significativement corrélé au pH-eau, au C/N et aux teneurs en P total. Toutefois, sa corrélation avec la CEC du sol est négative et significative. Le coefficient de détermination R^2 du modèle est de 0,7145, ce qui signifie que 71,45 % de la variance de de P-ass est expliquée par la CEC, le pH-eau, le rapport C/N et les teneurs en COS et en P total du sol. Pour la CEC, le modèle indique qu'elle est positivement et significativement ($P < 0,001$) corrélée à la teneur en COS, en K total et disponible et négativement et significativement à celle en P assimilable qui expliquent sa variance à seulement 32,35 %.

Tableau 5 : Régression linéaire entre le P, le K disponible et la CEC et les autres paramètres du sol

Paramètres dépendants	Variables explicatives	Estimation	Erreur standard	Pr(> t)
K-disponible	Intercept	-206	30,9	***
	CEC	5,04	1,07	***
	COS	9,50	4,12	*
	K_total	0,01	0,00	*
	pH.eau	15,6	6,94	*
	pH.KCl	32,0	6,96	***
	$R^2 = 0,5203$		Pr(>F) < 0,001	
P-assimilable	Intercept	-6,34	1,46	***
	C/N	0,13	0,05	*
	CEC	-0,18	0,04	***
	COS	0,41	0,25	
	P_total	0,01	0,00	***
	pH.eau	0,81	0,22	***

		$R^2 = 0,7145$	$Pr(>F) < 0,001$	
CEC	Intercept	3,46	0,55	***
	K-disponible	0,02	0,00	***
	K-total	0,00	0,00	***
	COS	1,36	0,32	**
	P-assimilable	-0,55	0,09	***
			$R^2 = 0,3235$	$Pr(>F) < 0,001$

Légende : * : significatif ; ** : hautement significatif ; *** : très hautement significatif P : phosphore ; K : potassium ; COS : carbone organique du sol ; CEC : capacité d'échanges de cation

Discussion

La comparaison des données de la caractérisation du sol du site d'étude aux normes du Bureau National des Sols (BUNASOLS, 1990) montre que les teneurs en COS, en N, P et K du sol sont moyennement élevées avec un sol fortement à moyennement acide. Toutefois, sa capacité d'échange de cation et ses teneurs en P-ass et K-disp sont très faibles. Ces résultats seraient imputables à l'irrigation excessive associée aux modes inadéquates de gestion de la fertilité des sols quotidiennement opérés par les producteurs dans la plaine irriguée. En effet, l'irrigation excessive peut créer un lessivage de la matière organique et des nutriments (Yr et al., 2022) et une accumulation de sels (Bazin, 2017) qui à leur tour, impacte négativement la fertilité des sols irrigués (Fairhurst, 2015). Ces résultats sont en adéquation avec ceux de Yaméogo et al. (2021) qui ont lié cette tendance à l'acidification à l'irrigation conventionnelle et à la fertilisation inappropriée. Par ailleurs, les résultats ont montré qu'après deux campagnes successives de mise en culture, les CEC des sols amendés aux phospho-composts avec ou sans le biochar sont statistiquement identiques et significativement plus élevées que celles du sol du témoin absolu. En effet, les phospho-composts auraient fourni au sol de la matière organique qui, en raison des charges négatives de ses composés humiques et fulviques, aurait amélioré la capacité de rétention du sol en cations K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} et de ce fait, contribuerait à augmenter la CEC du sol. Ce qui n'est pas le cas dans les parcelles du témoin absolu et de la FMV. Aussi, les résultats indiquent que les phospho-composts au biochar lorsqu'ils sont issus des résidus de fruits et légumes (PcomFLBio-100) améliorent significativement le pH-KCl (4,92) et les teneurs en P total ($437,78 \text{ mg.kg}^{-1}$), en P-ass ($1,94 \text{ mg.kg}^{-1}$) et en K-disp ($116,17 \text{ mg.kg}^{-1}$) par rapport au témoin absolu et à la FMV. L'incorporation des phospho-composts à base de résidus de fruits et légumes et du biochar aurait mieux fourni au sol des composés organiques stables enrichis en nutriments au regard des caractéristiques des résidus de fruits et légumes révélées par des travaux antérieurs (Traoré et al., 2016). De plus, en apportant des phospho-composts enrichis au biochar qui est

lui-même un composé organique stable (Allaire et al., 2015; Fischer et al., 2018) possédant des charges spécifiques et des groupes fonctionnels chargés positivement (Sohi et al., 2010 ; Khan et al., 2016 ; Archanjo et al., 2017), le pouvoir tampon du sol et sa capacité de rétention en nutriments augmentent limitant ainsi leur perte dans le sol (Nain et al., 2022). Ce qui explique l'amélioration significative du pH-KCl et, des teneurs en P et K total et leurs formes disponibles observée avec les phospho-composts au biochar surtout lorsqu'ils sont combinés à 100% de FMV (PcomBio-100 et PcomFLBio-100).

Le pH (eau et KCl) et les teneurs en COS, en éléments totaux (NP), en P-ass et K disp baissent de façon significative avec la profondeur du sol. Les amendements incorporés ont dû contribuer à la formation d'agrégats stables dans la couche 0-20 cm et favoriser une accumulation de la matière organique et des nutriments dans cette couche. Aussi, les racines des cultures notamment celles du maïs auraient prélevé des nutriments libérés dans les couches un peu plus profondes après minéralisation de la matière organique. Contrairement à ces résultats, Segda et al. (2014) ont notifié une accumulation de carbone organique et d'azote plus important dans la couche 20-50 cm par rapport à celle de 0-20 cm du sol dans la plaine irriguée de Bagré. Ces résultats suggèrent que l'incorporation des co-composts au biochar améliore le statut organique et nutritionnel des sols irrigués dans les horizons superficiels victimes quotidiennement des phénomènes de lessivage et de lixiviation.

Les teneurs des éléments totaux n'ont varié significativement d'une campagne à une autre. Par contre le pH, la CEC et les teneurs en K-disp ont significativement augmenté durant la deuxième campagne par rapport à la première. Ces résultats sont imputables aux variations des conditions de cultures entre les deux campagnes et les prélèvements opérés par les cultures. En effet, les conditions de submersion des parcelles au cours de la première campagne auraient créé une restriction de l'aération du sol ; ce qui diminue le taux de décomposition de la matière organique du sol (FAO et ITPS, 2015) et par ricochet, sa minéralisation pour libérer les éléments disponibles (Montaigne et al., 2018). Les cultures se contenteraient des éléments minéraux disponibles en fonction des types de fertilisation. L'effet inverse s'observerait avec la culture du maïs en deuxième campagne sans submersion des parcelles ; ce qui augmenterait la libération des nutriments sous leur formes disponibles dans le sol. Ces résultats sont en adéquation avec les travaux de Trolard et al. (2018) qui notifiaient que les agrosystèmes irrigués sont particulièrement dynamiques au plan biogéochimique marqué par une mobilisation d'éléments chimiques pour assurer la croissance végétative des cultures.

L'interaction entre la fertilisation, la profondeur de prélèvement et la campagne de mise en culture est significative pour les paramètres tels que la CEC, le P (total et assimilable) et le K total du sol. Cette interaction indique que les types de fertilisation opérés auraient induit une variabilité dans la disponibilité des nutriments du sol, qui diffère considérablement entre la culture du riz et celle du maïs en deuxième campagne. Elle pourrait également découler des modifications des propriétés du sol induites par les conditions édaphiques pendant chaque campagne et de la différence dans les besoins en nutriments et la capacité d'absorption des deux cultures. Ainsi, la variations du pH, de la CEC, du P total et assimilable et du K total ne dépendent pas seulement des prélèvements par les cultures en rotation (riz et maïs), mais aussi de l'impact des différents traitements administrés.

L'analyse de régression multiple a montré une relation linéaire significativement positive entre la CEC et le COS ($P = 0,002$) et entre le K-disp et le COS ($P = 0,02$). Ces résultats indiquent que le COS a un impact sur la CEC et la disponibilité du K dans le sol. Le P-ass est également corrélé négativement à la CEC et positivement au pH-eau du sol de façon significative. Quant au K-disp, la relation entre le pH (eau et KCl) et la CEC et ce paramètre est positive et significative. Ces résultats nous indiquent que la CEC et le pH du sol ont un impact sur les teneurs en P et K disponibles dans le sol et l'ensemble de ces paramètres sont contrôlés par la teneur en COS du sol. Ces résultats sont en cohérence avec les travaux de Houben et al. (2017) ; Yang et Lu (2022) qui révèlent une relation étroite entre le P-ass le pH du sol, et de Stockmann et al. (2024) qui lie la disponibilité du phosphore à la capacité de rétention du sol elle aussi influencée par le carbone organique du sol. En améliorant le pH et la CEC du sol, cela contribue à augmenter les teneurs en éléments nutritifs disponibles et leur prélèvement par les cultures serait plus accru surtout le P assimilable du sol.

Conclusion

L'objectif de la présente étude consistait à déterminer les effets de différents phospho-composts au biochar sur le pH, la CEC et les teneurs en COS, azote total, phosphore (total et assimilable) et potassium (total et disponible) du sol. Globalement, la CEC du sols amendés aux phospho-composts avec ou sans biochar a été significativement plus élevée que celle du témoin absolu. Aussi, le traitement PcomFLBio-100 a amélioré significativement les teneurs en P (total et assimilable) et en K disponible par rapport au témoin et à la FMV.

Ainsi, l'utilisation des composts de pailles de riz et de résidus de fruits et légumes produits avec l'ajout de phosphate naturel et du biochar permet d'améliorer les caractéristiques

chimiques des sols sous irrigation. Des investigations sont par ailleurs nécessaires pour évaluer leurs effets à long terme sur les rendements des cultures.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le technicien du Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la fertilité du sol et les Systèmes de Production (LERF/SP) ainsi que les stagiaires qui ont contribué à la conduite de cette étude. Les auteurs tiennent à remercier le Projet d'Appui à l'Enseignement Supérieur (PAES) du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, un des projets de l'Etat Burkinabé financé par la Banque Mondiale.

Conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts.

Contributions des auteurs

BMS : conduite des travaux de terrain, collecte et analyses statistiques des données, rédaction du manuscrit. DC, KC et HBN : encadrement, orientation de l'étude et correction du manuscrit.

Références bibliographiques

Allaire, S., Lange, S.F., Auclair, I., Quinche, M., Greffard, L., 2015. Analyses of biochar properties, Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, Université Laval. ed. Québec, Canada. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2789.4241>

Archanjo, B.S., Mendoza, M.E., Albu, M., Mitchell, D.R., Hagemann, N., Mayrhofer, C., Mai, T.L.A., Weng, Z., Kappler, A., Behrens, S., 2017. Nanoscale analyses of the surface structure and composition of biochars extracted from field trials or after co-composting using advanced analytical electron microscopy. *Geoderma* 294, 70–79.

Bacyé, B., Kambire, H.S., Sawadogo, M.O., Zonga, A.M., 2021. Effets des modes de gestion des résidus du bananier et d'options de fumure minérale sur le rendement du maïs et les caractéristiques chimiques du sol dans un système de rotation bananier /maïs à l'Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 15, 1208–1221. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i3.26>

- Bazin, F., 2017. Analyse des systèmes de production du périmètre irrigué de Bagré (Burkina Faso).
- Bikienga, M., 2001. Etude de faisabilité d'électrification rurale de quatre localités (Bama, Gayeri, Seytenga, Sebba) du Burkina Faso (Rapport final). Burkina Faso.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59, 39–46. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
- Bureau National des Sols (BUNASOLS), 1990. Manuel pour l'évaluation des terres.
- Cissé, D., Cornelis, J., 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, 5516–5526. <https://doi.org/10.1002/agj2.20867>
- Comité National des Semences (CNS), 2014. Catalogue national des espèces et des variétés agricoles au Burkina Faso.
- Compaoré, E., Nanéma, L.S., 2010. Compostage et qualité du compost de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. *Tropicultura* 28, 232–237.
- Epolyste, A., Yacouba, H., Zombre, P., 2015. Etat de fertilité des sols du périmètre irrigué gravitaire de Gouran dans la vallée du Sourou au Burkina Faso : Constats et perspectives. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 8, 2119. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i5.17>
- Fairhurst, T., 2015. Manuel de gestion intégrée de la fertilité des sols. CTA / CABI.
- FAO, ITPS, 2015. État des ressources mondiales en sols (Résumé technique), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et Groupe technique intergouvernemental sur les sols. Rome, Italie.
- Fischer, D., Erben, G., Dunst, G., Glaser, B., 2018. Dynamics of labile and stable carbon and priming effects during composting of sludge and lop mixtures amended with low and high amounts of biochar. *Waste Manag* 78, 880–893. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.056>

Fontes, J., Guinko, S., 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso (Notice explicative No. Projet campus). Ministère de la coopération française, Toulouse, France.

Gao, S., Harrison, B., Thao, T., Gonzales, M., An, D., Ghezzehei, T., Diaz, G., Ryals, R., 2023. Biochar co-compost improves nitrogen retention and reduces carbon emissions in a winter wheat cropping system. *GCB Bioenergy* 15. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13028>

Hillebrand, W.F., Lundel, G.E.F., Bright, H.A., Hoffman, J.I., 1953. *Applied Inorganic Analysis*, 2nd Edition. ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Houben, D., Hardy, B., Faucon, M.-P., Cornelis, J.-T., 2017. Effet du biochar sur la biodisponibilité du phosphore dans un sol limoneux acide. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* <https://doi.org/10.25518/1780-4507.13539>

Ibrahim, A., Saito, K., Bado, V.B., Wopereis, M.C.S., 2021. Thirty years of agronomy research for development in irrigated rice-based cropping systems in the West African Sahel: Achievements and perspectives. *Field Crops Research* 266, 108149. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108149>

Kambou, D., 2019. Évaluation des performances techniques de l'irrigation au Burkina Faso (Thèse de doctorat unique en sciences agronomiques et ingénierie biologique). Université de Liège - Gembloux Agro - Bio Tech, Gembloux, Belgium.

Khan, N., Clark, I., Sánchez-Monedero, M.A., Shea, S., Meier, S., Qi, F., Kookana, R.S., Bolan, N., 2016. Physical and chemical properties of biochars co-composted with biowastes and incubated with a chicken litter compost. *Chemosphere* 142, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.065>

Mahmood, F., Khan, I., Ashraf, U., Shahzad, T., Hussain, S., Shahid, M., Abid, M., Ullah, S., 2017. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *Journal of soil science and plant nutrition* 17, 22–32. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000002>

Montaigne, W., Debon, H., Domenach, A.-M., Roggy, J.-C., 2018. Gestion durable de la fertilité des sols par l'utilisation de matières organiques: retours d'expérience en Guyane française. *Innovations Agronomiques* 64, 71–82.

Nain, P., Purakayastha, T.J., Sarkar, B., Bhowmik, A., Biswas, S., Kumar, S., Shukla, L., Biswas, D.R., Bandyopadhyay, K.K., Agarwal, B.K., Saha, N.D., 2022. Nitrogen-enriched biochar co-compost for the amelioration of degraded tropical soil. *Environmental Technology* 1–16. <https://doi.org/DOI: 10.1080/09593330.2022.2103742>

Ouédraogo, A., Kabore, F., Kabore, O., 2022a. Perception de la fertilité des sols et stratégies d’adaptation des producteurs agricoles à Samandéni (Burkina Faso): Soil fertility perception and adaptation strategies of farmers in Samandéni (Burkina Faso). *Int. J. Bio. Chem. Sci* 16, 1536–1553. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v16i4.15>

Ouédraogo, J., Kpoda, K.C., Pouya, M., Serme, I., 2022b. Diagnostic de la fertilité chimique des principaux sols rizicoles de la Vallée du Sourou au Burkina Faso. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 38, 470–480.

Rhoades, J.D., 1982. In *Methods of Soil Analysis, Part 2, Second Edition* (A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, Eds.). ed, American Society of Agronomy. Madison, USA.

Segda, Z., Yameogo, L.P., Bonzi, M., Sedogo, M.P., 2014. Le carbone et l’azote dans les différentes fractions granulométriques d’un sol brun eutrophe tropical sous irrigation de Bagré au Burkina Faso : effets de modes d’apports différents de matières organiques et minérales. *J. App. Bioscience*. 78, 6743–6752. <https://doi.org/10.4314/jab.v78i1.6>

Segda, Z., Yameogo, P.L., Gnankambary, Z., Sedogo, P.M., 2013. Effets induits du type de fumure sur les paramètres chimiques du sol et sur le rendement paddy dans la plaine rizicole de Bagré au Burkina Faso. *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.* 36, 35–46.

Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., Bol, R., 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105, 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)

Stockmann, U., Farrell, M., Carter, T., Krawitz, S., Wong, V.N.L., Minoneti, V., Finau, D., Sharma, A., Barringer, J., Manu, V.T., Karunaratne, S., Macdonald, B.C.T., 2024. State and trend of surface soil organic carbon stocks and associated nutrients in Tongatapu, Kingdom of Tonga. *Soil Res.* 62. <https://doi.org/10.1071/SR23071>

Suriyagoda, L.B.D., 2022. Rice production in nutrient-limited soils: Strategies for improving crop productivity and land sustainability. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka* 50. <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v50i3.10601>

- Traoré, D., Nikiema, M., Somda, M., Sawadogo, J., Dianou, D., Traore, A., 2016. Contribution à la biométhanisation de la biomasse végétale: cas des résidus de légumes au Burkina Faso Contribution to the biometanation of plant biomass: case of vegetable residues in Burkina Faso. *International Journal of Biologicals and chemical Sciences* 10, 35–47. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i1.4>
- Trolard, F., Irfan, K., Shahzad, T., Bourrié, G., 2018. Dynamiques bio-géochimiques en rizière - les apports du monitoring in situ. *Le riz et la Camargue : vers des agro-systèmes durables*.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science* 37, 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, Y., Villamil, M.B., Davidson, P.C., Akdeniz, N., 2019. A quantitative understanding of the role of co-composted biochar in plant growth using meta-analysis. *The Science of the total environment* 685, 741–752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.244>
- Yaméogo, L., Yanogo, P.I., Sanou, K., 2020. Dynamique spatiale et enjeux stratégiques de la riziculture au Burkina Faso. *L’Espace Politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique*. <https://doi.org/10.4000/espacepolitique.7608>
- Yaméogo, P.L., Traore, A., Bandaogo, A.A., 2021. Influence des modes de gestion de l’eau et de la fumure minérale sur quelques paramètres chimiques du sol et le rendement du riz à la Vallée du Kou au Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences* 165, 17099–17110.
- Yang, C., Lu, S., 2022. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol. *Science of the Total Environment* 805, 150325. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150325>
- Yr, H.S.R., Vishnu, P., Yavasvi, B., Changade, D.N.M., 2022. Effect on soil fertility under different cropping sequences, irrigation levels and fertilizer doses: A review. *Pharma Innovation* 11, 2189–2193.
- Yu, H., Xie, B., Khan, R., Shen, G., 2019. The changes in carbon, nitrogen components and humic substances during organic-inorganic aerobic co-composting. *Bioresource Technology* 271, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.088>