

Durabilité d'un sol ferrugineux tropical lessivé sous différents modes de gestion continue de résidus de récolte dans une rotation triennale coton-maïs-sorgho en zone semi aride de l'Afrique de l'Ouest

[Sustainability of a leached tropical ferruginous soil under different continuous crop residue management methods in a three-year cotton-maize-sorghum rotation in semi-arid areas of West Africa]

Pouya Mathias Bouinzwendé¹, Gnankambary Zacharia¹, Sempore Wendyam Aristide², Kiba Delwendé Innocent¹, Serme Ben Idriss¹, Lompo François¹, and Sedogo Michel¹

¹Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Burkina Faso

²Université Daniel-Ouezzin-COULIBALY, Burkina Faso

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In the semi-arid zones of West Africa, the relationships between organic matter management methods, soil quality who has resulted and cotton production, remains little or poorly known. In a simple non-randomized block design located at Boni in western Burkina Faso, we studied the impact of three organic matter management methods on soil quality and cotton yield over a period of thirty years. The three modes of crop residue management compared were: extensive management, where residues are exported (SI); semi-intensive management (SII); and intensive management of crop residues (SIII), corresponding to compost and recycled manure inputs respectively. The results showed that, over time, cotton yields and rainfall fluctuated almost identically, whatever the crop residue management method. In terms of soil chemical properties, compost (7.16 g.kg⁻¹) and manure (6.75 g.kg⁻¹) reduced the degradation of soil fertility compared with the initial soil (7.70 g.kg⁻¹).

Investigation into the determinants of cotton production at farm level showed that the factors controlling cotton yield are major elements (C, N, Pas and Kt), exchangeable bases (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ and K⁺) and CEC.

Regardless of how soil fertility is managed, cultivation has led to a decline in soil fertility. This study served as a reminder of the benefits of good agricultural practices for sustainable soil fertility management.

KEYWORDS: soil fertility, cotton, Boni, Burkina Faso.

RESUME: En zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, les relations entre les modes de gestion de la matière organique, la qualité du sol et la production cotonnière, qui en résultent, reste très peu ou mal connue. Dans un dispositif expérimental en blocs simples non randomisés localisé à Boni à l'Ouest du Burkina Faso, nous avons étudié sur une durée de trente années l'impact de trois modes de gestion de la matière organique sur le sol et sur le rendement du cotonnier. Trois modes de gestion des résidus de récolte sont mis en comparaison sont: la gestion extensive où les résidus sont exportés (SI); la gestion semi-intensive (SII) et la gestion intensive des résidus de récolte (SIII) correspondant respectivement aux apports de compost et de fumier recyclés. Les résultats ont montré sur la durée une fluctuation quasi-similaire des productions cotonnières et de la pluviosité quel que soit le mode de gestion des résidus de récolte. Sur les propriétés chimiques du sol, les apports de compost (7,16 g.kg⁻¹) et de fumier (6,75 g.kg⁻¹) ont permis d'atténuer le processus de dégradation de la fertilité du sol par rapport au sol de départ (7,70 g.kg⁻¹).

L'investigation sur les déterminants de la production cotonnière à l'échelle de l'exploitation a montré que les facteurs contrôlant le rendement du cotonnier sont les éléments majeurs (C, N, Pas et Kt) et les bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺) et la CEC. Quel que soit le mode de gestion de la fertilité des sols, la mise en culture des sols a entraîné une baisse de la fertilité des sols. Cette étude a servi de cadre pour rappeler les bénéfices des bonnes pratiques agricoles afin de gérer durablement la fertilité du sol.

MOTS-CLEFS: fertilité du sol, cotonnier, Boni, Burkina Faso.

1 INTRODUCTION

Le recyclage des résidus de cultures est une pratique ancienne qui se justifie pleinement par la valeur agronomique de ces résidus. Les résidus de cultures épandus sont avant tout des matières organiques et à ce titre leur apport a des effets qui sont entre autres, la stimulation globale des populations microbiennes ou de la faune et l'amélioration des propriétés physico-chimiques des sols (Amonmide *et al.*, 2019; Aune, 2020). Les résidus de cultures recyclés vont s'incorporer aux matières organiques du sol et donc participer à leur cycle biogéochimique (Biielders and Gérard, 2015; Brassard *et al.*, 2018). D'une manière générale, la matière organique des sols joue un rôle prépondérant dans la fertilité des sols et dans la réduction des gaz à effet de serre (Koulibaly *et al.*, 2016). Le mode de gestion des résidus de récolte influe directement sur la matière organique des sols (Bacye *et al.*, 2019). Pourtant, dans les systèmes de production à base de coton et de céréales, les résidus de récolte sont brûlés ou pâturés, ce qui entraîne souvent des bilans minéraux déficitaires (Duvvada and Maitra, 2020). Aussi on note une forte minéralisation de la matière organique du sol non compensée par des restitutions organiques adéquates qui se traduit par une baisse rapide de sa teneur dans le sol (Tittonnell *et al.*, 2010). Il se pose donc une rupture des équilibres écologiques liée aux modalités de gestion des terres. Dans les zones cotonnières du Burkina Faso, la mise en culture des sols est suivie d'une dégradation rapide de leur fertilité. Le cotonnier est pourtant très sensible à cette dégradation de la fertilité des sols qui se traduit par l'apparition généralisée des symptômes de déficiences minérales (Kindohoundé *et al.*, 2019). Cette baisse de la fertilité des sols est exacerbée par la crise cotonnière en Afrique de l'Ouest et la crise énergétique mondiale. En effet, c'est essentiellement à travers la filière coton que les agriculteurs de ces pays accèdent aux crédits sur les intrants agricoles. Les engrais acquis sont détournés au profit des céréales qui bénéficient déjà des arrières-effets des engrais appliqués en culture cotonnière (Koulibaly *et al.*, 2016). Cette pratique constitue des entraves à une gestion durable de la fertilité des sols dans les agro-systèmes cotonniers.

Partant de ce constat et des connaissances actuelles sur l'état de fertilité des sols en zones cotonnières du Burkina Faso, notre objectif est d'évaluer l'impact agro-pédologique de trois modes de gestion des résidus de récolte sous une rotation triennale coton-maïs-sorgho. Les résultats qui vont découler de cette étude permettront d'une part de faire des recommandations pour une meilleure gestion des résidus de récolte au niveau de l'exploitation agricole, et d'autre part, de mieux cerner l'interdépendance entre le flux des nutriments et les rendements du cotonnier.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITE D'ÉTUDE

Le dispositif expérimental est implanté depuis 1982 sur la ferme expérimentale de Boni au Burkina Faso (3°26' de longitude Ouest, 11°32' de latitude Nord et 302 m d'altitude) sur un sol ferrugineux tropical. Le climat est du type sud-soudanien avec une saison pluvieuse allant de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. La pluviométrie moyenne du site de Boni varie entre 800 et 1000 mm, répartie sur 40 à 75 jours de pluie (Fontes J. et Guinko S., 1995).

2.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

L'expérimentation est conduite sur six hectares subdivisés en 12 blocs simples non randomisés de 5000 m² cultivés selon une rotation triennale coton-maïs-sorgho. Trois modes de gestion des résidus de récolte combinés à des apports de phosphate naturel (25% P₂O₅ et 35% CaO) et d'engrais minéraux sont comparés:

- a. **Gestion extensive des résidus de récolte (SI).** Les tiges de maïs et de sorgho sont pâturées ou exportées de la parcelle. Tous les trois ans sur le maïs, 300 kg ha⁻¹ de phosphate naturel sont apportés à l'hersage.

- b. **Gestion semi-intensive des résidus de récolte (SII).** En moyenne 4 t ha⁻¹ de tiges de sorgho sont recyclées en compost après 45 jours de broyage par 20 bœufs dans un parc où on apporte 300 kg de phosphate naturel. Ce compost est appliqué tous les trois ans sur le maïs à 6 t ha⁻¹ et contient en moyenne: 28% de matière organique; 2,2 g kg⁻¹N; 1,9 mg kg⁻¹ P; 1,8 mg kg⁻¹ K et 0,3% S.
- c. **Gestion intensive des résidus de récolte (SIII).** Les 4 t ha⁻¹ de tiges de sorgho sont recyclées en fumier dans un parc d'hivernage sous l'action seule des eaux de pluies après 60 jours de broyage par 20 bœufs. Ce fumier de parc contient 28% de matière organique; 2,2 g kg⁻¹ N; 1,1 mg kg⁻¹ P; 1,7 mg kg⁻¹ K et 0,3% S. Il est utilisé à 6 t ha⁻¹ tous les trois ans sur le maïs avec 300 kg ha⁻¹ de phosphate naturel.

Sur les traitements SII et SIII, les tiges de maïs sont enfouies au sol par un labour de fin d'hivernage tandis que les tiges de cotonniers sont coupées et brûlées en petits tas sur tous les traitements. La fertilisation minérale (engrais solubles et phosphate naturel) ramenée à l'année, apporte par hectare 46 N, 25 P, 48 K, 18 S et 1 B sur le cotonnier (100 kg ha⁻¹ d'urée + 100 kg ha⁻¹ de K₂SO₄ + 4 kg ha⁻¹ boracine), 74 N, 25 P, 60 K sur le maïs (160 kg ha⁻¹ d'urée + 100 kg ha⁻¹ de KCl, 46 N et 25 P sur le sorgho (100 kg. ha⁻¹ d'urée).

Les variétés de cotonnier, de maïs et de sorgho utilisées ont des potentiels de rendement respectifs de 3 à 4 t.ha⁻¹, 4 à 5 t.ha⁻¹ et 2 à 3 t.ha⁻¹.

2.3 PRATIQUES CULTURALES

Un labour du sol au tracteur à partir de mai précède les semis effectués du 20 mai au 10 juillet selon les années. Un démariage est pratiqué 15 jours après la levée afin de ramener les trois cultures à une densité théorique de 62 500 plants ha⁻¹. La lutte contre les mauvaises herbes est réalisée par des désherbages chimiques, manuels et mécaniques. La protection du cotonnier est assurée par les programmes de traitements insecticides vulgarisés.

2.4 ECHANTILLONNAGE DU SOL

Des échantillons de sol ont été prélevés sur les parcelles de coton pour suivre l'évolution du carbone, de l'azote, du phosphore (total et assimilable), des bases échangeables, de la CEC et du pH eau et pH KCl. Chaque année, les rendements des trois cultures sont évalués.

2.5 ANALYSES STATISTIQUES

Le logiciel Rstudio a servi à l'Analyse en Composante Principale et à réaliser les boxplots. Le logiciel Genstat, 9^e édition a été utilisé pour l'analyse de variance des données et le test de Newman Kheuls pour la séparation des moyennes au seuil de probabilité de 5%.

Nous avons recherché des groupes de variables explicatives en fonction des aspects agronomiques et des propriétés des sols. C'est ainsi que deux groupes de variables ont été distingués: (i) l'un caractérisant la nutrition des végétaux (alimentation hydrique et alimentation minérale = eau, argile + limon, matière organique et N, P, K) et (ii) l'autre le complexe absorbant du sol (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, CEC). Le logiciel Rstudio a servi à établir les interdépendances entre les deux groupes de variables et leurs relations avec les rendements. L'analyse en composante principale (ACP) a été menée à deux niveaux:

- **Au niveau de l'exploitation agricole**, représentée par toute l'expérimentation. Cette démarche est holistique et vise à comprendre les facteurs qui expliquent ou contribuent à l'élaboration de rendement du cotonnier.
- **Au niveau système**: il correspond à chaque mode de gestion des résidus de récolte. Cette analyse vise à évaluer les groupes de variables qui influencent le rendement du cotonnier de chaque système.

Pour l'analyse de la durabilité agronomique et pédologique, les logiciels Rstudio et Genstat 9^e édition ont permis de réaliser respectivement les boxplots et le calcul des variances. A cet effet, les caractéristiques physico-chimiques et les rendements du cotonnier ont été considérés sur dix cycles de rotations triennales coton-maïs-sorgho. Chaque cycle constitue une répétition.

3 RÉSULTATS

3.1 IMPACT DE TROIS MODES DE GESTION DE RESIDUS DE RECOLTE SUR LE RENDEMENT DU COTONNIER (1982-2012)

La figure 1 présente l'évolution des rendements en coton graine sur dix cycles de rotation triennale coton-maïs-sorgho selon la méthode des moyennes glissantes (sur 3 ans). La « moyenne glissante » permet le remplacement d'un point donné par la moyenne des points dans un intervalle centré autour de ce point de plus ou moins ample largeur. Pour la première année d'expérience (1982) et pour la dernière année de mesure des rendements (2012), l'ordonnée du point représente le rendement de l'année. On note une fluctuation générale des rendements du cotonnier d'une année à l'autre. L'analyse des courbes des rendements montre:

- Plusieurs épisodes baisse/remontée des rendements qui suivent l'évolution des variations interannuelles de la pluviosité;
- Un effet net des différents modes de gestion des résidus de récolte, différencié et constant sur la durée;
- Sur la durée de l'expérience, que la gestion extensive des résidus de récolte est la pratique la moins efficace comparativement à la gestion semi-intensive et à la gestion intensive des résidus de culture.

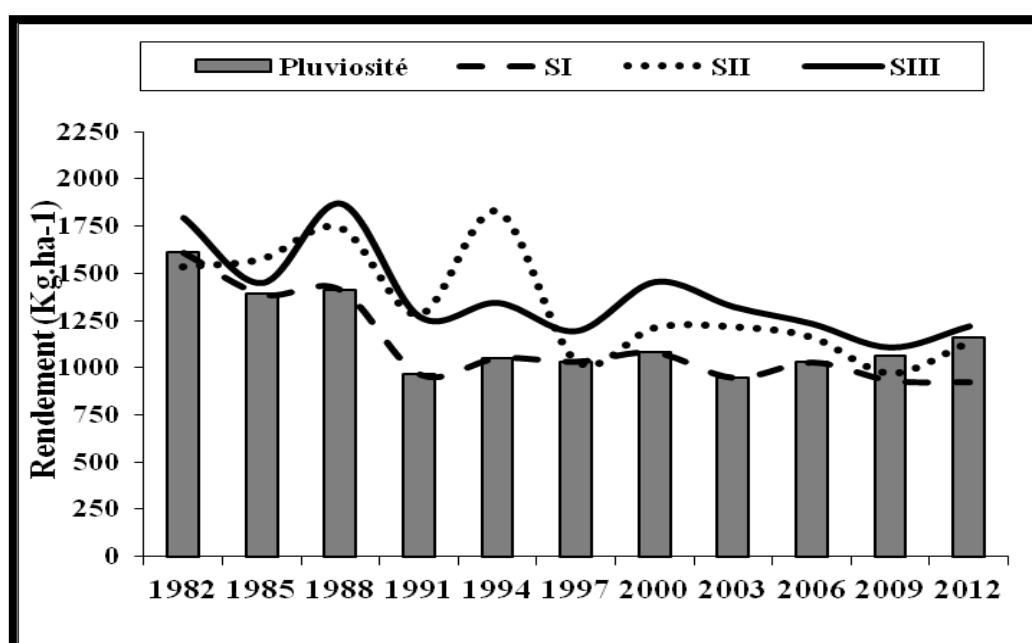


Fig. 1. Evolution des rendements en coton grain (moyennes glissantes, 3 ans)

SI: Gestion extensive des résidus de récolte (pâturage des résidus de maïs et de sorgho);

SII: Gestion semi-intensive des résidus de récolte (recyclage des résidus de sorgho en compost);

SIII: Gestion intensive des résidus de récolte (recyclage de tiges de sorgho en fumier dans un parc d'hivernage).

La figure 2 présente les rendements moyens en coton-graine sur 10 cycles de rotation triennale coton-maïs-sorgho. Sur trente années de gestion des résidus de récolte, on observe une efficacité agronomique des modes de gestion semi-intensive et intensive des résidus de récolte. L'exportation des résidus de récolte a induit le rendement moyen en coton-graine le plus faible. Cependant, les apports de compost et surtout de fumier ont permis d'avoir des rendements élevés comparés à la pratique traditionnelle.

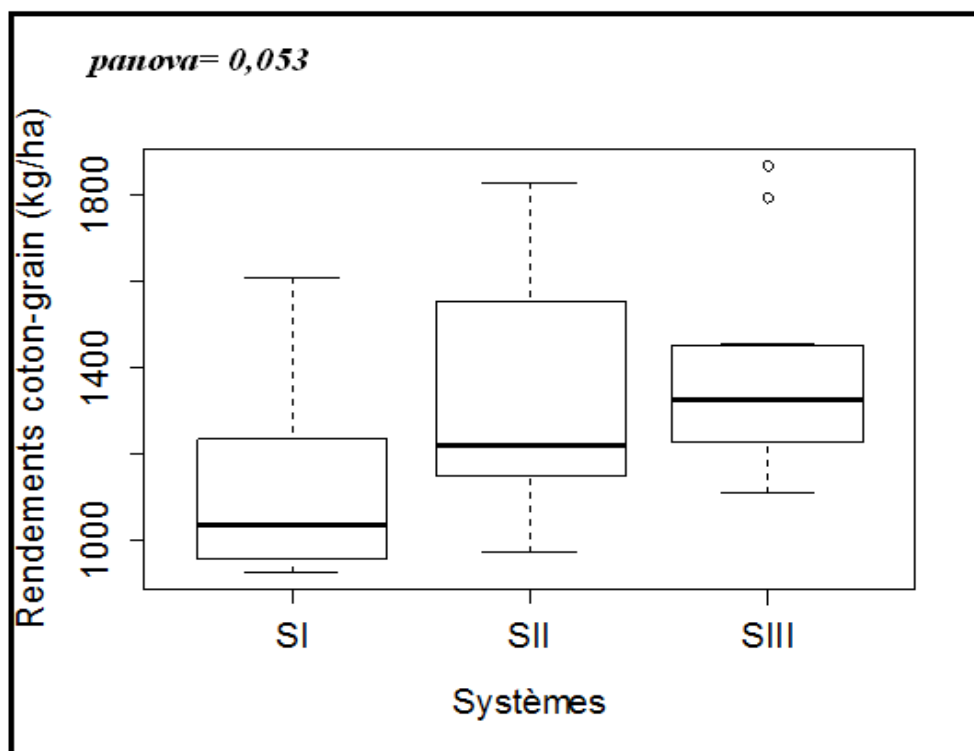


Fig. 2. Rendement moyen en coton grain sur 10 cycles de rotation triennale coton-maïs-sorgho

Le trait horizontal à l'intérieur des diagrammes en boîte représente la médiane.

SI: Gestion extensive des résidus de récolte (pâturage des résidus de maïs et de sorgho);

SII: Gestion semi-intensive des résidus de récolte (recyclage des résidus de sorgho en compost);

SIII: Gestion intensive des résidus de récolte (recyclage de tiges de sorgho en fumier dans un parc d'hivernage).

3.2 FACTEURS CONTROLANT LA PRODUCTION DU COTONNIER SOUS LES TROIS MODES DE GESTION DE RESIDUS DE RECOLTE À L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

La figure 3 montre les résultats de l'analyse multivariée ACP sur l'influence des variables explicatives sur les rendements du cotonnier. Les modes de gestion des résidus de récolte à l'échelle de l'exploitation ont eu une influence significative ($F = 2,88$; $p = 0,036$) sur les rendements en coton graine avec respectivement 62 % (A) et 77% (B) de la variabilité expliquée par les deux axes canoniques de chaque ACP (A, B).

- En A, le premier axe expliquant 39 % de la variabilité est déterminé par le pH_{KCl} ($r = 0,49$) et la pluviométrie ($r^2 = 0,57$). Le second axe expliquant 23% de la variabilité est déterminé par le phosphore assimilable ($r^2 = 0,71$), l'azote total ($r^2 = 0,52$), le carbone total ($r^2 = 0,51$). Aussi entre l'azote et le carbone organique, l'azote et le phosphore assimilable il existe des corrélations respectives de 53% et 55%. Enfin une corrélation ($r^2 = 0,57$) existe entre le phosphore assimilable et le potassium.
- En B, l'ensemble des groupes de variables explicatives ont significativement influencé les rendements du cotonnier ($F = 3,88$; $p = 0,007$) avec près de 77% de la variabilité expliquée par les deux axes canoniques. Les nutriments qui expliquent le rendement en coton-graine sont pour la majorité expliquée par l'axe 1 avec près de 58% de la variabilité et sont représentés par le sodium, le potassium échangeable et le magnésium. Aussi la CEC joue un rôle important sur la production du cotonnier.

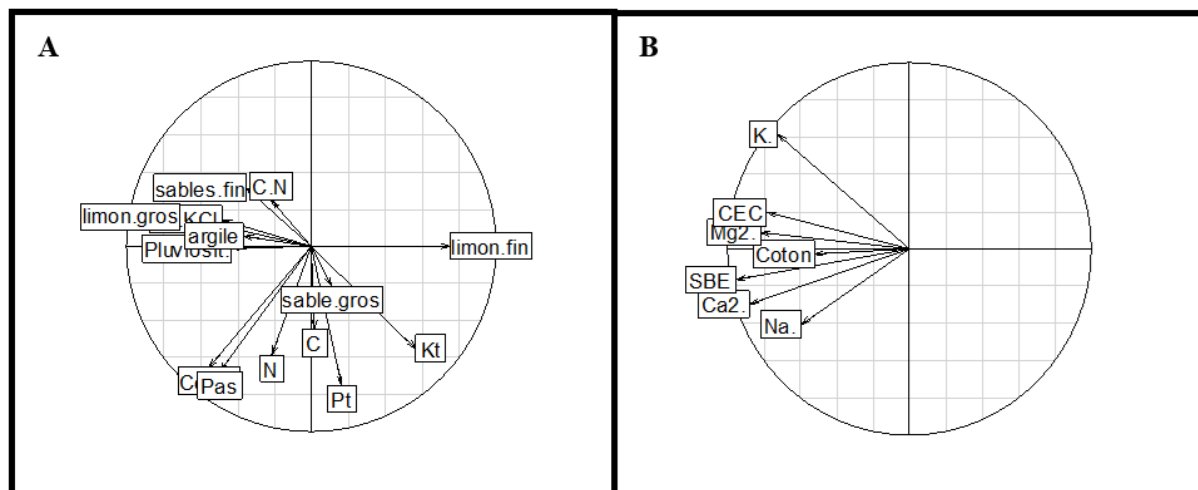


Fig. 3. Corrélation entre les propriétés physico-chimiques du sol (A), les oligo-éléments, la CEC et la SBE du sol (B), et interrelation de ces deux groupes de variables avec le rendement en coton-graine sous trois modes de gestion des résidus de récolte (SI, SII, SIII) à l'échelle de l'exploitation agricole) sur 10 cycles de rotation triennale coton-maïs-sorgho

Les vecteurs représentent les variables de l'ACP. La taille et l'orientation des vecteurs représentent les corrélations entre les variables et avec les axes. Coton = rendement coton, C = carbone, C/N = rapport C/N, N = azote, Kt = potassium, Pas = phosphore assimilable, Pt = phosphore total, CEC = capacité d'échange cationique, Mg^{2+} = ion magnésium, Ca^{2+} = ion calcium, Na^+ = ion sodium, SBE = somme des bases échangeables.

3.3 IMPACT DES TROIS MODES DE GESTION DES RESIDUS DE RECOLTE SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL

MODE DE GESTION DES RESIDUS DE RECOLTE SUR LES PROPRIETES CHIMIQUES DU SOL

Les résultats du tableau 1 montrent que la gestion à long terme des résidus de récolte a significativement influencé les propriétés chimiques du sol ($p < 0,05$), essentiellement le pHKCl, l'azote et le potassium. L'application continue du compost a donné pour les propriétés chimiques du sol des valeurs significativement plus élevées que celles observées sur les propriétés chimiques du sol avec les autres modes de gestion des résidus de récolte. Elle est suivie par la pratique d'apport de fumier de parc. La pratique traditionnelle de gestion des résidus a enregistré les plus faibles teneurs en nutriments. D'une manière générale, on a observé sur la durée de l'expérimentation, une baisse générale des teneurs en nutriments sous les trois modes de gestion des résidus de récolte (figure 7).

Sur la matière organique du sol, les apports de compost et de fumier ont contribué à freiner la baisse de teneur de la matière organique du sol par rapport à la pratique traditionnelle de gestion des résidus de récolte. Les pertes de matière organique sont estimées à 19,7%; 7% et 12,9 % respectivement avec les pratiques du pâturage des animaux, les apports de compost et de fumier. De même les trois modes de gestion des résidus de récolte ont entraîné une baisse des teneurs du sol: en azote de 11,8 à 30,9 %; en potassium total de 4,1 à 6,4% et en phosphore de 2,1 à 9,6%. Par contre l'apport de compost a influencé positivement le potassium et le phosphore total du sol soient 10,5% et 16,9 %.

Sur la teneur en oligo-éléments en CEC et en SBE, les pertes sont plus élevées sous la pratique de la gestion traditionnelle comparées aux modes d'applications de compost et de fumier (tableau 2). L'apport continu de fumier a réduit la perte des oligo-éléments et la baisse de la CEC et de la SBE. Aussi après trente années de gestion des résidus de récolte, on a noté une baisse générale de la teneur des oligo-éléments du sol comparativement aux teneurs observées dans le sol de départ (figure 8). On enregistre une baisse importante en magnésium avec l'exportation des pailles (43,2%) comparée avec l'application continue du compost et du fumier (35,5 et 19,8%). Pour le potassium échangeable, la pratique de l'exportation des résidus, les apports de compost et de fumier ont induit une perte respectivement de 48,8; 38,7 et 19,4 %. Les mêmes tendances de baisse sont observées avec la CEC et la SBE. Par ailleurs les apports continus de compost et de fumier ont respectivement amélioré la teneur du sol en calcium de 13,4% et en sodium de 20%.

Tableau 1. Teneurs moyennes des éléments chimiques du sol sur 10 cycles de rotation triennale sous différents modes de gestion des résidus de cultures

Système	Carbone	N total	K total	P total	Passimilable	C/N	pH KCl
	(g kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)				
SD	7,70 ± 0,85	0,68 ± 0,42 b	1789 ± 124 ab	206,7 ± 3,0	11,50 ± 0,06	5,21 ± 0,23
SI	6,18 ± 0,69	0,47 ± 0,05 a	1675 ± 114 a	202,3 ± 7,4	11 ± 0,7	12,52 ± 1,08	5,45 ± 0,02
SII	7,16 ± 0,30	0,60 ± 0,04 ab	1976 ± 187 b	241,7 ± 32,0	13 ± 1,3	10,81 ± 0,63	5,40 ± 0,04
SIII	6,75 ± 0,12	0,55 ± 0,05ab	1716 ± 73 ab	186,8 ± 22,9	12,2 ± 0,5	10,96 ± 0,48	5,60 ± 0,16
Signification	NS	S	S	NS	NS	NS	S
Probabilité au seuil de 5%	0,061	<0,001	0,003	0,16	0,729	0,358	0,11

SD: sol de départ. SI: Gestion extensive des résidus de récolte (pâturage des résidus de maïs et de sorgho); SII: Gestion semi-intensive des résidus de récolte (recyclage des résidus de sorgho en compost); SIII: Gestion intensive des résidus de récolte (recyclage de tiges de sorgho en fumier dans un parc d'hivernage).

Tableau 2. Teneurs moyennes des bases échangeables sur 10 cycles de rotation triennale sous différents modes de gestion des résidus de cultures

Système	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CEC	K ⁺	SBE
	(cmol kg ⁻¹)					
SD	2,01 ± 0,01 ab	0,81 ± 0,22	0,05 ± 0,002	4,88 ± 0,58	0,31 ± 0,09	3,17 ± 0,31 ab
SI	1,73 ± 0,27 a	0,46 ± 0,13 a	0,04 ± 0,005	3,65 ± 0,66	0,16 ± 0,06	2,56 ± 0,41a
SII	1,99 ± 0,01 ab	0,52 ± 0,07 ab	0,06 ± 0,012	4,37 ± 0,07	0,19 ± 0,03	2,78 ± 0,08 ab
SIII	2,28 ± 0,28bc	0,65 ± 0,06 bc	0,04 ± 0,008	4,55 ± 0,25	0,25 ± 0,04	3,17 ± 0,31 b
Signification	S	S	NS	NS	NS	S
Probabilité au seuil de 5%	0,022	<0,001	0,6	0,368	0,21	0,031

SD: sol de départ. SI: Gestion extensive des résidus de récolte (pâturage des résidus de maïs et de sorgho); SII: Gestion semi-intensive des résidus de récolte (recyclage des résidus de sorgho en compost); SIII: Gestion intensive des résidus de récolte (recyclage de tiges de sorgho en fumier dans un parc d'hivernage).

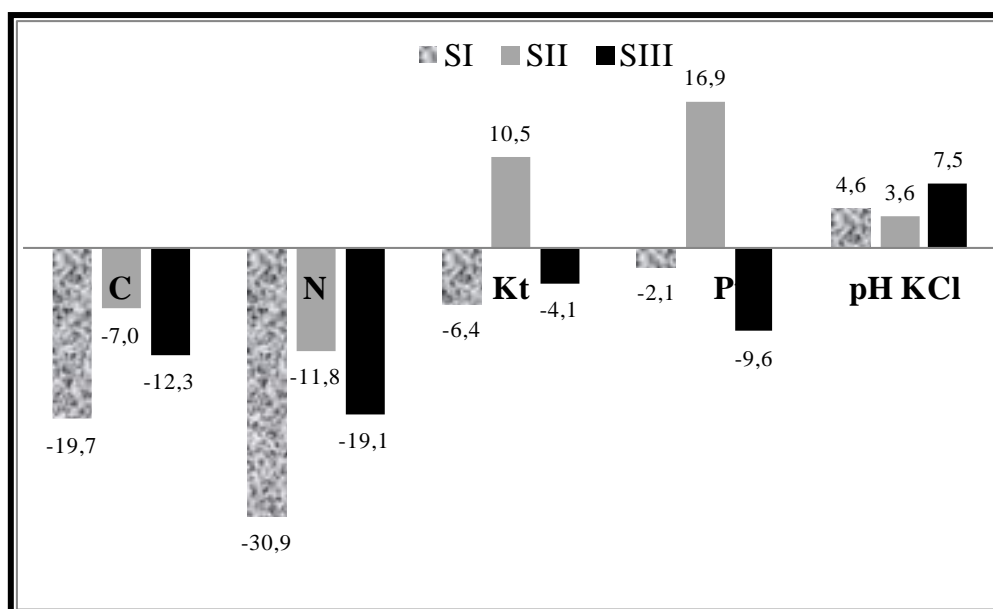


Fig. 4. Variation (%) des teneurs en nutriments par rapport au sol de départ

SI: Gestion extensive des résidus de récolte (pâturage des résidus de maïs et de sorgho);

SII: Gestion semi-intensive des résidus de récolte (recyclage des résidus de sorgho en compost);

SIII: Gestion intensive des résidus de récolte (recyclage de tiges de sorgho en fumier dans un parc d'hivernage).

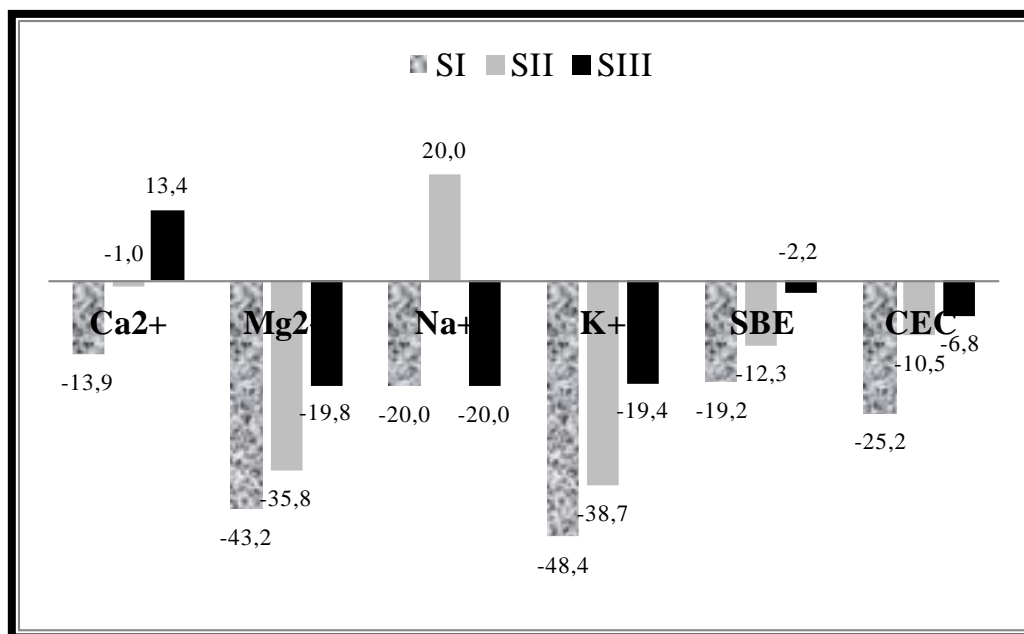


Fig. 5. Variation (%) des teneurs en bases échangeables par rapport au sol de départ

SI: Gestion extensive des résidus de récolte (pâturage des résidus de maïs et de sorgho);

SII: Gestion semi-intensive des résidus de récolte (recyclage des résidus de sorgho en compost);

SIII: Gestion intensive des résidus de récolte (recyclage de tiges de sorgho en fumier dans un parc d'hivernage).

4 DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent des fluctuations interannuelles importantes des rendements du cotonnier suivant les régimes pluviométriques des dix cycles triennaux. Les fluctuations pluviométriques expliquent vraisemblablement la variabilité interannuelle des rendements du cotonnier. Les modes de gestion des résidus de récolte ont influencé les rendements du cotonnier. A partir de 1997, l'efficacité agronomique des modes de gestion des résidus de récolte a augmenté respectivement de la gestion traditionnelle à la gestion intensive des résidus de récolte en passant par la gestion semi-intensive des résidus de récolte. La durée de mise en culture des terres et l'évolution de la fertilité du sol sous les trois modes de gestion des résidus de récolte ont influencé à long terme les rendements en coton-graine. En effet, la variabilité des rendements d'une même exploitation serait liée à une variabilité temporelle et surtout spatiale des conditions édaphiques mais aussi et surtout à diverses pratiques agricoles (Dekoula *et al.* 2018; Faye *et al.* 2019). Pour Tittonell *et al.* (2010), la pluviométrie contribue à expliquer la variabilité des rendements d'une année à l'autre mais la variabilité spatio-temporelle des sols et les modes de gestion de la fertilité expliquent le devenir des rendements des cultures en Afrique.

Par ailleurs, après trente années de gestion des résidus de récolte, les résultats obtenus sur les rendements corroborent la thèse de Zingoré *et al.*, (2007) sur l'impact des trois modes de gestion des résidus de récolte sur les rendements du cotonnier. Ces modes de gestion ont influencé les propriétés physico-chimiques du sol et la production cotonnière. Diogo *et al.* (2010); Giller *et al.* (2011) ont montré que les différentes pratiques de gestion de la fertilité des sols ont des effets sur les propriétés chimiques des sols dont dépendent les rendements des cultures.

4.1 MODES DE GESTION DES RESIDUS DE RECOLTE ET LA PRODUCTION DU COTONNIER: FACTEURS CONTROLANT LES RENDEMENTS DU COTONNIER À L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

L'étude des variables explicatives des rendements à l'échelle de l'exploitation permet de cerner la diversité des modes de gestion des résidus de récolte, des pratiques de fertilisation, et d'évaluer leur impact sur le rendement en coton-graine et les propriétés physico-chimiques du sol. Les différents résultats montrent que l'approche à l'échelle de l'exploitation agricole des modes de gestion de la matière organique explique mieux les relations entre les rendements du cotonnier et les propriétés physico-chimiques du sol qu'une analyse individuelle de chaque mode de gestion. A l'échelle de l'exploitation, plusieurs facteurs contrôlent le rendement du cotonnier. Ce sont notamment les éléments majeurs (C, N, P, K) et la pluviométrie. Comme

précédemment, la pluviosité résultant des dix cycles culturaux contribuent à expliquer les rendements du cotonnier. Aussi, les résultats ont montré que sur la durée, la pluviosité ne suffit pas à elle seule à expliquer les rendements du cotonnier. L'état de fertilité du sol résultant des diverses pratiques agricoles (Odhiambo *et al.*, 2011; Bacyé *et al.*, 2019) et les modes de gestion de la fertilité des sols (Neto *et al.*, 2010; Akpo *et al.*, 2016) contribuent à l'élaboration des rendements du cotonnier. En effet, l'apport de matière organique en surface favorise en début de cycle, le développement racinaire (Haileslassie *et al.*, 2006). Ceci induit une meilleure utilisation de l'eau et des éléments nutritifs du sol et par conséquent le développement accru de la plante permettant ainsi d'améliorer la production végétale (Bambara *et al.*, 2018; Bonkougou *et al.*, 2019). De plus, la matière organique joue un rôle capital dans la fourniture d'éléments nutritifs à la plante. Ce qui explique vraisemblablement la corrélation entre le carbone organique et l'azote.

Sur le même dispositif, Koulibaly *et al.* (2010) ont montré que l'apport de la matière organique à la culture du coton et du maïs sous forme de compost entraîne un bilan positif de l'azote. Par conséquent, la matière organique et l'azote sont deux facteurs très liés qui contrôlent à terme (30 ans) le rendement du cotonnier. Ainsi, pour une fumure azotée optimale, l'alimentation des céréales s'effectue aux $\frac{3}{4}$ à partir de la matière organique des sols (Brock *et al.*, 2011).

Entre l'azote et le phosphore assimilable, il existe un lien étroit. Ce lien s'explique par le fait que dans le continuum solution du sol-plantes, il y a une influence mutuelle dans l'absorption de ces deux éléments. En d'autres termes, l'azote peut constituer un facteur limitant à la nutrition phosphatée et vice versa. Leur carence est très souvent associée à des désordres nutritionnels pouvant compromettre les productions agricoles. En général, la carence en phosphore est une contrainte principale pour la production agricole en Afrique de l'Ouest. La réponse de l'azote devient importante lorsque l'eau et le phosphore sont non limitants (Lompo *et al.*, 2009; Koulibaly *et al.*, 2010). Il en est de même pour le transfert du phosphore et du potassium dans la plante, d'où cette apparente corrélation. Par conséquent, les teneurs du sol en phosphore assimilable, en carbone organique total et en azote total semblent déterminer le rendement du cotonnier. A cela s'ajoutent certains minéraux secondaires (magnésium, calcium) et cations (sodium, potassium échangeable) et la capacité d'échange cationique (CEC) qui sont nécessaires pour le fonctionnement normal du cycle biochimique du cotonnier. Le rôle du calcium et du magnésium au cours des principales phases de développement du végétal et dans la plupart des fonctions vitales des plantes n'est plus à démontrer (Elalaoui, 2007; Koulibaly *et al.*, 2016). Le calcium présent dans le suc cellulaire est indispensable pour le développement du cotonnier. Il est impliqué dans la division cellulaire et joue un rôle majeur dans le maintien de l'intégrité de la membrane. Le magnésium participe à la formation et à la mise en réserve des sucres, des hydrates de carbonate et des vitamines. De plus la chlorophylle, pigment vert de la plante, est de ce fait riche en magnésium. La capacité d'échange en actions (CEC) du sol quant à elle est un indicateur important de la qualité des sols. Elle donne une information sur la constitution du sol et notamment la contribution des argiles et des matières organiques (Monaco *et al.*, 2008; Koulibaly *et al.*, 2016). De ce fait, les cations échangeables, par leur grande contribution à la formation des différents axes dans l'ACP, revêtent une importance non négligeable dans la physiologie du cotonnier (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) et surtout dans l'état physico-chimique du sol (CEC)

4.2 IMPACT DES MODES DE GESTION DES RESIDUS DE RECOLTE SUR LES CARACTERISTIQUES DU SOL

4.2.1 IMPACT DES FUMURES ET DES RESIDUS DE RECOLTES SUR LES PROPRIETES CHIMIQUES DU SOL

La contrainte majeure des exploitants cotonniers du Burkina est la baisse progressive de la capacité de production des terres cultivées. En effet, la mise en culture des terres a entraîné une modification des propriétés physico-chimiques du sol. Après trente années de pratiques de différents modes de gestion des résidus de récolte, on observe une baisse des teneurs en éléments nutritifs du sol. Pourtant les travaux d'Ibrahima *et al.* (2009) en savanes soudano-guinéennes de Ngaoundéré au Cameroun ont montré que les modes de gestion de la matière organique restaurent efficacement la teneur en matière organique et le pH du sol, ainsi que N, P, Ca et Mg du sol. Aussi, les effets améliorateurs de ces substrats organiques sur les propriétés chimiques, physiques, biologiques et des rendements des cultures ont été démontrés par les travaux de Bosshard *et al.* (2009), Oberson *et al.* (2010). Les différences observées entre nos résultats et ceux obtenus par ces auteurs s'expliquent par les conditions pédo-climatiques différentes, les exportations par les cultures et l'état initial de la fertilité du sol. Les résultats de Koulibaly *et al.* (2010) sur ce dispositif ont mis en évidence une baisse graduelle de la fertilité avec la durée de mise en culture des parcelles. Cette baisse est plus accentuée sur le sol en mode de gestion traditionnelle des résidus de récolte. Par contre avec les apports de compost ou de fumier, la baisse des teneurs des différents éléments nutritifs est faible. L'apport de compost a permis de maintenir les teneurs en azote, en potassium, en phosphore total et phosphore assimilable des sols. A défaut de maintenir le potentiel de production, l'apport combiné des matières organiques et de la fumure minérale, réduit la baisse des rendements liée à l'exploitation continue des terres (Benjamin *et al.*, 2010). Aussi permettent-elles de réduire les risques d'une dégradation de la fertilité des sols (Porter *et al.*, 2010).

4.2.2 IMPACT DES FUMURES ET DES RESIDUS DE RECOLTE SUR LE COMPLEXE ABSORBANT

Les résultats enregistrés des sols ont montré un appauvrissement des parcelles de cotonnier en bases échangeables sous les trois modes de gestion de la matière organique. On a observé une baisse relativement importante des bases échangeables surtout avec l'exportation des résidus des cultures. Cela s'explique par la baisse des teneurs en carbone et aussi par les prélèvements de nutriments par le cotonnier. La pratique de l'agriculture minière a de lourdes conséquences sur la fertilité des sols et la production des cultures. Selon Autfray *et al.* (2012) les contraintes majeures dans les exploitations cotonnières de l'Afrique de l'Ouest sont les risques d'une dégradation de la fertilité du sol. Cette dégradation des sols est liée, d'une part, à la mise en culture des champs aggravés par une faible utilisation des engrais et, d'autre part, aux pratiques inappropriées de gestion de la fertilité des sols. Cela a pour conséquence une baisse importante du statut organique du sol et par suite un appauvrissement du sol en nutriments et en bases échangeables. Les apports de compost et du fumier ont permis d'atténuer cet appauvrissement du sol en bases échangeables et en capacité d'échange cationique. La CEC est un indicateur de l'état de fertilité chimique d'un sol. Pour Neto *et al.* (2008), une CEC élevée confère au sol une grande capacité de rétention des bases issues des cycles biochimiques du sol ou des apports externes.

La CEC donne une information sur la constitution du sol notamment la contribution des argiles et des matières organiques (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002). Cela implique une étroitesse vraisemblable des relations entre ces trois paramètres. Ainsi la connaissance de la CEC et aussi du pH permet de caractériser le sol dans un état proche de celui *in situ* et donc de révéler les changements des propriétés des sols du fait de pratiques de fertilisation et d'amendements (Pernes-Debuyser et Tessier, 2002).

5 CONCLUSION

Diverses sources de matières organiques sont utilisées au Burkina Faso pour amender les champs. Ces amendements organiques sont très souvent considérés comme une alternative aux coûts des engrais. Les effets bénéfiques de ces substrats organiques sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol ne sont plus à démontrer. Cette étude révèle qu'après trente années de gestion extensive des résidus de récolte, on a une tendance à la baisse des propriétés physico-chimiques du sol. Les apports du compost et du fumier ont permis d'atténuer cette baisse de fertilité du sol. Sur la durée, on note une fluctuation comparable de la pluviosité et des rendements en coton graine sous les trois modes de gestion de la fertilité des sols. La pluviosité s'est révélée être un des facteurs qui influence la production du cotonnier. Les fractions fines du sol se sont révélées être un facteur limitant la production du cotonnier dans les systèmes d'exploitation minière du sol. Cette étude a servi de cadre pour rappeler les bénéfices des bonnes pratiques agricoles afin de gérer durablement la fertilité du sol par l'utilisation combinée des engrais minéraux et des amendements.

Le compost et le fumier utilisés à la dose de $6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ tous les trois ans (ou $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) ne permettent pas de maintenir efficacement la fertilité des sols. L'application bisannuelle de $6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de fumier et de compost apparaît plus appropriée pour freiner la dégradation du sol. En outre une application de $300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de phosphates naturels en fumure de fond la première année plus $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en fumure complémentaire annuelle de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ s'inscrit comme une stratégie pour résoudre durablement la problématique de fertilité des agro-systèmes tropicaux très carencés en phosphore. Ceux-ci peuvent directement être utilisés lors du compostage pour permettre une solubilisation des phosphates naturels et ainsi améliorer l'efficacité de l'utilisation du phosphore par les cultures. Il s'en suit la nécessité d'intensifier l'utilisation des amendements organiques et des phosphates naturels au niveau des exploitations cotonnières pour augmenter la qualité du substrat organique et par conséquent la production agricole et pérenniser le potentiel du capital productif des sols. L'utilisation des pailles posant des contraintes de compétition pour les divers usages et de non-disponibilité en quantité suffisante, il est recommandé la pratique du parage des animaux dans les champs et celle des fosses fumières pour améliorer la qualité des matières organiques et ainsi accroître les rendements des récoltes. Aussi, les résidus de coton peuvent être valorisés en compost par des techniques de compostage appropriées afin de contribuer à augmenter les sources de matière organique pour enrichir le sol.

REFERENCES

- [1] Akpo M.A., Saïdou A., Yabi L., Baalogoun I. et Biobigou B.L., 2016. Indicateurs paysans d'appréciation de la qualité des sols dans le bassin de l'Okpara au Bénin. *Etude et Gestion des Sols*, 23: 53-65.
- [2] Amonmide, I., Dagbenonbakin, Gustave, Agbangba, Emile, Akponkpe, Irekatche. 2019. Contribution à l'évaluation du niveau de fertilité des sols dans les systèmes de culture à base du coton au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. DOI: 10.4314/ijbcs.v13i3.52.
- [3] Aune J. B., Tadesse B. A., Coulibaly A. Borgvang S., 2020. L'intensification agricole au Mali et au Soudan à travers l'amélioration de la fertilité du sol et la mécanisation. 105: 87-105. *International Environment and Development Studies*, Noragric <https://hdl.handle.net/11250/2687892>.
- [4] Autfray P., Sissoko F., Falconnier G., Ba A., Dugué P., 2012. Usages des résidus de récolte et gestion intégrée de la fertilité des sols dans les systèmes de polyculture élevage: étude de cas au Mali-Sud. *Cahiers Agricultures* 21: http://www.jle.com/fr/revues/agro_biotech/agr/sommaire.phtml?cle_parution=3731225-34.
- [5] Bacyé B., Kambiri H. S. et Somé A. S., 2019. 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- 2941.
- [6] Bambara D., Bilgo A., Sawadogo J., Gnankambary Z. et Thiombiano A., 2018. Evaluation de la diversité et de la qualité de pratiques d'agriculteurs face à la dégradation du milieu biophysique au Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences*, 125: 12551-12565.
- [7] Benjamin J.G., Halvorson A.D., Nielsen D.C., Mikha M.M., 2010. Crop management effects on crop residue production and changes in soil organic carbon in the Central Great Plains. *Agronomy Journal*, 102, pp. 990-997.
- [8] Bielders C. L and Gérard B., 2015. Millet response to microdose fertilization in south-western Niger: Effect of antecedent fertility management and environmental factors. *Field Crops Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.008> 0378-4290/© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.
- [9] Bonkougou J., Compaoré J., Traoré F., Beucher O. et Bikienga I., 2019. Analyse de vulnérabilités des systèmes agraires de la région de la Boucle du Mouhoun au Burkina Faso. *European Scientific Journal ESJ*, 15 (2), 104–120.
- [10] Bosshard C., Sorensen P., Frossard E., Dubois D., Mäder P., Nanzer S., Oberson A., 2009. Nitrogen use efficiency of 15N-labelled sheep manure and mineral fertiliser applied to microplots in long-term organic and conventional cropping systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 83, 271-287.
- [11] 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>
- [12] Bray RH, Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59: 39-45.
- [13] Brock C., Fliessbach A., Oberholzer H. R., Schulz F., Wiesinger K., Reinicke F., Koch W., Pallutt B., Dittman B., Zimmer J., Hülsbergen K. J., Leithold G., 2011. Relation between soil organic matter and yield levels of nonlegume crops in organic and conventional farming systems. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2011, 174: 568–575.
- [14] Coulibaly K., Gnissien M., Yaméogo T. J., Traoré M. et Nacro B. H., 2016. Perception des producteurs sur l'utilisation des déjections de chenilles dans la gestion de la fertilité des sols dans la région des Hauts-Bassins au Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences*, 108: 10531-10542.
- [15] Dekoula, C. S., Kouame, B., N'goran, E. K., Yao, F., Ehounou, J. N., & Soro, N. (2018). Impact de la variabilité pluviométrique sur la saison culturale dans la zone de production cotonnière en Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, ESJ, 14 (12), 143-156.
- [16] Diogo R.V.C., Buerkert A., Schlecht E., 2010. Horizontal fluxes and food safety in urban and peri-urban vegetable and millet cultivation of Niamey, Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87, 81-102.
- [17] Duvvada, S.K. and Maitra, S. 2020. Sorghum-based intercropping system for agricultural sustainability. *Indian J. Nat. Sci.*, 10 (60): 20306-20313.
- [18] Elalaoui A. C., 2007. Fertilisation minérale des cultures. Les éléments minéraux secondaires et oligo-éléments. *Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès. MAPM/DERD/ Septembre 2007*.
- [19] Faye B, Dome T, Ndiaye D, Diop C, Faye G, Ndiaye A (2019) Évolution des terres salées dans le Nord de l'estuaire du Saloum (Sénégal). *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 25 (2): 81–90.
- [20] Fiala K., Tuma I. & Holub P., 2009. Effect of Manipulated Rainfall on Root Production and Plant Belowground Dry Mass of Different Grassland Ecosystems. *Ecosystems* 12, 906- 914.
- [21] Fliessbach A., Oberholzer H.R., Gunst L., Mäder P., 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (2007) 273–284.

- [22] Fontes J. et Guinko S., 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Notice explicative. ICIV, IDR, Ministère de la Coopération Française (Projet Campus 88313101), 53 p.
- [23] Giller K. E., Corbeels M., Nyamangara J., Triomphe B., Affholder F., Scopel E., Tifton P., 2011. A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems, *Field Crops Research* 124, 468–472.
- [24] Hailelassie, A., Priess J.A., Veldkamp, E., Lesschen, J. P., 2006. Smallholders' soil fertility management in the Central Highlands of Ethiopia: implications for nutrient stocks, balances and sustainability of agroecosystems, *Nutr Cycl Agroecosyst*, 75: 135–146.
- [25] Ibrahima A., Abib Fanta C. et Ndjouenkeu R., 2009. Impact de la gestion de la matière organique sur le statut minéral des sols et des récoltes dans les savanes soudano-guinéennes de Ngaoundéré, Cameroun. In: Seiny-Boukar L., Boumard P. (Eds). *Savanes africaines en développement: innover pour durer*, Actes du colloque, Garoua, Cameroun, pp 1-10.
- [26] Hien E., 2004. Dynamique du carbone dans un Acrisol ferrugineux du Centre-Ouest Burkina: Influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Doctorat en Sciences du Sol à l'École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 138p.
- [27] Kindohoundé et al., *J. Appl. Biosci.* 2019 Importance des manifestations des symptômes de déficience minérale du palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) dans les plantations paysannes au Sud-Bénin en Afrique de l'Ouest. *Journal of Applied Biosciences* 143: 14701 - 14712 ISSN 1997-5902.
- [28] Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N., Bondé D., 2010. Effets de la valorisation des résidus de récolte sur la nutrition minérale du cotonnier et les rendements d'une rotation coton-maïs-sorgho dans l'Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biology and Chemistry Sciences* 4: 2120-2132.
- [29] Lompo F., Segda Z., Gnankambary Z., Ouandaogo N., 2009. Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs. *Tropicultura*, 27 (2): 105-109.
- [30] Luo, Y.Q., 2004. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *Bioscience* 54, 731-739.
- [31] Magani I.E. and Kuchinda C., 2009. Effect of phosphorus fertilizer on growth, yield and crude protein content of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) in Nigeria, *Journal of Applied Biosciences* 23: 1387 – 1393.
- [32] Monaco S., Hatch D.J., Sacco D., Bertora C., Grignani C., 2008. Changes in chemical and biochemical soil properties induced by 11-yr repeated additions of different organic materials in maize-based forage systems. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 608-615.
- [34] Neto M.S., Scopel E., Corbeels M., Cardoso A.N., Douzet J.M., Feller C., Piccolo M., Cerri C.C., Bernoux M., 2010. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. *Soil & Till Res.* 110: 187 -195.
- [35] Oberson A. Tagmann H.U., Langmeier M., Dubois D., Mäder P., Frossard, E., 2010.
- [36] Fresh and residual phosphorus uptake by ryegrass from soils with different fertilization histories. *Plant Soil* 334, 391-407.
- [37] Odhiambo J. J. O., 2011. Potential use of green manure legume cover crops in smallholder maize production systems in Limpopo province, South Africa, *African Journal of Agricultural Research* 6 (1): 107-112.
- [38] Pernes-Debuyser A. et Tessier D., 2002. Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols: Cas des 42 parcelles de l'INRA à Versailles. INRA Science du Sol, Route de St Cyr, 78026 Versailles Cedex. *Étude et Gestion des Sols, Volume 9, 3, 2002 - pages 177 à 186.*
- [39] Porter C. H. Jones J.W., Adiku S., Gijsman A. J., Gargiulo O. & Naab, J. B., 2010. Modeling organic carbon and carbon-mediated soil processes in DSSAT V4.5. *Operational Research* 10, 274–278.
- [40] Steinaker D.F., Wilson S.D. & Peltzer, D.A., 2010. Asynchronicity in root and shoot phenology in grasses and woody plants. *Global Change Biology* 16: 2241-2251.
- [41] Tifton P., Muriuki A, Shepherd K.D., Mugendi D., Kaizzi K.C., Okeyo J., Verchot L., Coe R., Vanlauwe B., 2010. The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa – A typology of smallholder farms, *Agricultural Systems* 103: 83–97.
- [42] Traoré A., Yaméogo L. P., DA I. A. N., TRAORE K., BAZONGO P. et TRAORE O., 2020. Effet de la formule unique d'engrais 23-10-05 +3,6S+2,6Mg+0,3Zn sur le rendement du maïs Barka dans la zone Sud-soudanienne du Burkina Faso. *Afrique SCIENCE*, 16 (1) 260-270.
- [43] Ulrich, S., Tischer S., Hofmann B., Christen, O., 2010. Biological soil properties in a long-term tillage trial in Germany, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173: 483-489.
- [44] Vagen T. G., Lal R. & Singh B.R., 2005. Soil carbon sequestration in sub-Saharan Africa: a review. *Land Degradation & Development* 16: 53-71.
- [45] Zougmore R., Mando A., Stroosnijder L., 2010. Benefits of integrated soil fertility and water management in semi-arid West Africa: an example study in Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88: 17-2.