ARTICLES ORIGINAUX ORIGINAL ARTICLES

OORSPROKELIJKE ARTIKELS ARTICULOS ORIGINALES

Impact des modes de gestion de la fertilité du sol et des systèmes de cultures sur la nutrition azotée et les rendements du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) au Niger

Z. Hamidou^{1*}, S. Mahamane¹, W.A. Payne², M. Sedogo³, F. Lompo³ & H.B. Nacro⁶

Keywords: Millet- Legume- Cropping system- Nitrogen- Phosphorus- Isotopic dilution- Niger

Résumé

Afin d'identifier les meilleures modalités de gestion de la fertilité des sols en conditions sahéliennes, les objets suivants ont été comparés dans un essai réalisé selon un dispositif en carré latin sur trois systèmes de culture mil-niébé (monoculture, culture associée et rotation) de 2011 à 2013 à Kalapaté (Niger): (i) témoin sans application de fumure, (ii) micro-dose de NPK (6 g par poquet de 15-15-15) + 30 kg N ha⁻¹, (iii) phosphates naturels (30 kg ha⁻¹ de P_2O_5) + 30 kg N ha⁻¹, (iv) phospho-compost (5 tonnes ha⁻¹) + 30 kg N ha⁻¹ et (iv) Super phosphate Simple (30 kg P_2O_5 ha⁻¹) + 50 kg N ha⁻¹. Du NPK et de l'urée marqués avec l'isotope 15N ont été utilisés en vue d'évaluer la contribution des fumures organo-minérales et du niébé à la nutrition azotée du mil. Les résultats ont donné des rendements du mil significativement différents de ceux du témoin, avec des accroissements de rendement variant de 116 à 299%. La rotation niébé-mil associée à ces technologies, a induit une augmentation du rendement en grain de mil de 40 à 112% par rapport à la monoculture. L'utilisation de la méthode isotopique 15N a permis de mettre en évidence le rôle important que joue la rotation dans l'absorption de l'azote et son prélèvement du sol. La moyenne des «Land Equivalent Ratio» (LER) calculée pour l'ensemble des associations culturales comparées s'élève à 1,46. Ce qui indique qu'il est plus avantageux de pratiquer l'association des cultures

Summary

Impact of Soil Fertility Management Practices and Cropping Systems on Nitrogen Nutrition and Yields of Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) in Niger

To identify the best methods of soil fertility management in Sahel conditions, the following objects were compared in a trial conducted according to a Latin square arrangement from 2011 to 2013 at Kalapaté (Niger) in three different milletcowpea cropping systems (monoculture, intercropping, and rotation): (i) control without manure application, (ii) micro-dose of NPK (6 g of 15-15-15) per hole + 30 kg N ha^{-1} , (iii) rock phosphates (30 kg $ha^{-1} P_2 O_5$) + 30 kg N ha^{-1} , (iv) phospho-compost (5 tones ha⁻¹) + 30 kg N ha⁻¹ and (iv) Super Simple phosphate (30 kg P_2O_5 ha⁻¹) + 50 kg N ha⁻¹. ¹⁵N isotope marked NPK and urea were used to assess the contribution of organic and mineral fertilization and of cowpea cultivation to the Nitrogen nutrition of millet. Millet yields of the treatments were significantly different from the control with yield increases ranging from 116 to 299%. Cowpea-millet rotation associated with these technologies led to a mean increase in grain yield of millet varying from 40 to 112% compared to monoculture. The use of the 15N isotope method evidenced the major role played by crop rotation in Nitrogen removal and uptake from the soil.

¹Institut National de la Recherche Agronomique du Niger, Niamey, Niger.

²University of Nevada, Reno, Nevada, USA.

³Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Ouagadougou, Burkina Faso.

⁴Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du Sol, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.

^{*}Auteur corespondant: zeinabou_h@yahoo.fr

par rapport à la monoculture. Ces technologies améliorent donc la productivité agricole en permettant une utilisation rationnelle de la terre et une meilleure mobilisation de l'azote du sol. The average Land Equivalent Ratio (LER) calculated from all compared crop associations amounts to 1.46. This indicates that it is more advantageous to practice intercropping than monoculture. Therefore these technologies improve agricultural productivity by enabling efficient use of land and better mobilization of soil nitrogen.

Introduction

L'agriculture représente plus de 25% du produit intérieur brut (PIB) de la plupart des pays africains, et est la principale source de revenus et d'emplois pour au moins 65% de la population de l'Afrique estimée à 750 millions (24). Selon Henao & Baanante (24), le développement agricole est essentiel à la croissance économique de l'Afrique, à la sécurité alimentaire, et à la lutte contre la pauvreté. l'agriculture Cependant, des sahéliens est caractérisée par une faible productivité agricole. Les sols ont une faible fertilité intrinsèque et les éléments nutritifs exportés par les cultures ne sont pas restitués de manière adéquate. L'Afrique subsaharienne a la plus basse consommation d'engrais minéraux au monde, environ 10 kg d'éléments nutritifs par hectare et par an (4, 13). Le faible taux d'utilisation d'engrais minéraux s'explique par leur coût élevé par rapport aux faibles revenus des producteurs (1). Or, une gestion durable et intégrée de la fertilité des sols constitue une condition préalable à l'amélioration de la productivité agricole. Cette gestion de la fertilité doit prendre en compte l'utilisation des fumures minérales et organiques et des légumineuses, tout en valorisant les ressources naturelles locales organiques et minérales (1, 20, 33).

Par ailleurs, au Sahel, les sols sont très pauvres en phosphore. Les engrais phosphatés solubles manufacturés sont généralement recommandés pour corriger cette insuffisance. Paradoxalement, la plupart de ces pays dispose d'importants gisements de phosphates naturels dont la valorisation pourrait contribuer à résoudre les problèmes de carence en phosphore des sols (33, 36, 49). Sur la base de leurs caractéristiques minéralogiques, chimiques et texturales, plusieurs auteurs ont indiqué l'adéquation de leur application directe (12, 49).

Au Niger, il a été démontré que les roches phosphatées des gisements de Tahoua sont aptes pour une application directe, alors que celles du Parc du W le sont moins (12). Selon une étude effectuée sur la caractérisation physico-chimique du phosphate naturel de Tahoua (38), le PNT est un phosphate sédimentaire de type nodulaire, appartenant à la famille des apatites; sa quantité a été estimée à 7,5 millions de tonnes (30).

En outre, l'efficacité agronomique des phosphates naturels peut être améliorée lorsqu'ils sont incorporés dans le processus de compostage (33, 49). L'utilisation de de la matière organique constitue un préalable pour la restauration et le maintien de la fertilité des sols (23, 40, 45). Cependant, le problème de sa disponibilité en quantité et en qualité se pose au Sahel (11, 33). Or le compostage des résidus organiques permet une valorisation plus efficiente de ceux-ci pour améliorer la fertilité du sol (26, 27).

La décomposition des débris organiques améliore en effet le processus de minéralisation, et donc, la disponibilité des nutriments pour les plantes. Le compostage des débris organiques généralement à C/N élevé, permet également de réduire l'immobilisation d'azote qui se produit s'ils doivent être décomposés par les microorganismes du sol. Par ailleurs, dans l'objectif de remédier au risque associé à l'utilisation des engrais minéraux dans les conditions de faible humidité du sol, et compte tenu du faible pouvoir d'achat des producteurs, la technique de la micro-dose des engrais est pratiquée (12). Dans ces conditions, l'application d'une micro-dose, c'est-à-dire d'une petite quantité d'engrais, dans chaque poquet en même temps que la semence au moment du semis, constitue une technologie prometteuse pour les producteurs (10, 43, 44). De plus, par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, les légumineuses peuvent améliorer la disponibilité de l'azote du sol et augmenter le rendement des céréales subséquentes et associées (8, 9).

Cependant, peu de données existent au Niger sur la contribution en azote des légumineuses dans les systèmes de cultures et sur leurs impacts sur la nutrition azotée des céréales (23). C'est dans ce cadre que s'est inscrite la présente étude, avec l'hypothèse qu'une gestion intégrée des fumures, associée au potentiel de fixation de l'azote par les légumineuses, permet d'améliorer la nutrition azotée et les rendements du mil. Les objectifs étaient d'évaluer la contribution du niébé et des modes de gestion de différents types de fumure sur la nutrition azotée du mil, et d'identifier des modes de gestion de la fertilité du sol à la portée des producteurs, permettant d'améliorer rentablement les rendements des cultures.

Matériel et méthode

Site de l'étude

Les expérimentations agronomiques ont été réalisées sur trois ans (2011-2013) à Kalapaté, localité située à 115 km à l'Est de Niamey: 13°20' N de Latitude et 2°93' E de Longitude au Point d'Appui de l'Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN). La saison des pluies s'étale de Juin à Octobre.

Durant les années de l'expérimentation, la pluviosité a été de 327 mm répartis en 28 jours en 2011, de 910 mm répartis en 22 jours en 2012, et de 521 mm répartis en 27 jours en 2013.

Sols

Avant le début de l'expérimentation, les sols ont été caractérisés. Les analyses ont été effectuées au laboratoire des sols de l'INRAN (34). Le pH-H₂O et pH-KCl ont été mesurés au pH-mètre selon un rapport sol/eau distillée de 1: 2.5 et sol/KCl 1M de 1: 2.5 respectivement. Le phosphore assimilable a été dosé par la méthode Bray1 (16), et le phosphore total par la méthode de l'acide nitrique (16). Le carbone organique a été dosé selon la méthode Walkey et Black (46), l'azote total par la méthode Kjeldahl (25). La capacité d'échange cationique effective (CECE) correspond à la somme des bases du complexe d'échange (Bases

échangeables et l'acidité d'échange extraites respectivement par les solutions de l'acétate d'ammonium et KCI, ont été dosées par spectrométrie d'absorption atomique, photométrie à flamme et titrimétrie). L'analyse granulométrie a été effectuée selon la méthode de la pipette de Robinson.

Les sols appartiennent à la classe des lixisols (29). Ils sont pauvres en azote, phosphore et carbone organique, et ont une capacité d'échange cationique faible. Ils sont très sableux et pauvres en éléments fins (Tableau 1).

Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué du Mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) variété HKP, et de quatre variétés de niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) (variétés KVX; locale Kalpaté; TN5-78; IT90 372).

Fumure

Les fertilisants suivants ont été utilisés:

- L'urée 46% N; NPK: $15 \text{ N} 15 \text{ P}_2\text{O}_5 15 \text{ K}_2\text{O}$; le Super Phosphate Simple (SSP): 18% de P_2O_5 ; Le Phosphate Naturel de Tahoua (PNT): 31,24% de P_2O_5 (Tableau 2) (38)
- Le Phospho-Compost (P C) a été préparé selon les procédures recommandées localement (22, 28).

Dispositif expérimental

Les traitements ont été appliqués sur des parcelles de 50 m² (10 m x 5 m) dans quatre systèmes de cultures impliquant le mil et le niébé: (i) niébé en rotation avec le mil; (ii) niébé en association avec le mil (cultivés en continu); (iii) la culture en bandes du mil et du niébé. En outre, deux traitements témoins correspondant à la culture du mil ou du niébé en pur et en continu ont été inclus dans le dispositif de recherche. Quatre variétés de niébé ont été utilisées dans l'essai.

Les combinaisons systèmes de cultures x variétés de niébé ont été cultivées selon cinq technologies: (A, B, C, D et E):

Technologie A ou Faible, avec une densité de 10 000 poquets ha-1 (1 m x 1 m) et sans engrais; les parcelles de 50 m² des cultures en pur ont été subdivisées en deux pour abriter les deux cultures de mil et de niébé.

Tableau 1Caractéristiques physiques et chimiques des sols à Kalapaté.

PH-H ₂ O	5,4
PH-Kcl	4,4
P-Bray (mg kg ⁻¹)	6,9
Total-P (mg kg ⁻¹)	368
C. Org (mg kg ⁻¹)	1200
M.O (mg kg ⁻¹)	2100
Total-N (mg kg ⁻¹)	110
C/N	10,9
CEC-Ag (cmol $^+$ kg $^{-1}$)	1,3
Sable (g kg ⁻¹)	936
Limon (g kg ⁻¹)	27
Argile (g kg ⁻¹)	37

Tableau 2Composition chimique du phosphate naturel de Tahoua.

Eléments majeurs	%	Eléments traces	mg kg ⁻¹
CaO	43,12	Ti	500
P_2O_5	31, 24	Nd	438,3
Fe ₂ O ₃	8,68	Sr	430,5
Al_2O_3	1,84	Zn	136,5
Na ₂ O	0,26	As	68,2
K ₂ O	0,12	Ni	61,4
Y_2O_3	0,16	U	34,8
MgO	0,2	Ва	21,3
MnO	0,1	Cr	19,5
SiO ₂	8	Pb	7,9
		Cu	5,4
		Cd	3,1

(Source: Natatou et al. 2005).

Ainsi dans les parcelles de la technologie A, au niveau des cultures pures pour les systèmes en continu, en rotation et en bande se trouvent trois lignes de 9 m de mil et trois lignes de 9 m de niébé distantes de 1 m entre les lignes avec une distance de 1 m entre les poquets sur la ligne. En ce qui concerne l'association des cultures, dans la parcelle de 50 m² du traitement A, une ligne de niébé s'intercale entre deux lignes du mil avec une distance de 1 m entre les lignes successives de mil et de niébé et de 1 m entre les poquets dans les lignes.

- Technologie B ou Moyenne 1, avec une densité de 17 777 poquets ha-1 (0,75 m x 0,75 m), et où 6 g de NPK (15-15-15) ont été appliqués par poquet en ligne, au semis. L'urée à raison de 30 kg N ha⁻¹ a été apportée en deux fractions au tallage et à la montaison dans les parcelles principales. Le NPK et l'urée ont été marqués à 1% d'isotope ¹⁵N (5). Pour évaluer la contribution des fumures et du niébé à la nutrition azotée du mil, le NPK et marqués ont été appliqués sur les l'urée micro-parcelles du mil, au même moment que et l'urée ordinaires ont été apportés le NPK aux parcelles principales. Les micro-parcelles, délimitées par des tôles, contiennent quatre poquets de mil.
- Technologie C ou Moyenne 2, avec une densité de 17 777 poquets ha⁻¹ (0,75 m x 0,75 m) et où 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ont été appliqués sous forme de Phosphate Naturel de Tahoua (PNT), soit 130 kg PNT ha⁻¹ au poquet en ligne, au semis. L'urée ordinaire et l'urée marquée à 1%, à la dose de 30 kg N ha⁻¹, ont été apportées en deux fractions au tallage et à la montaison, respectivement sur les parcelles principales et les micro-parcelles.
- Technologie D ou Moyenne 3, avec une densité 17 777 poquets ha-1 (0,75 m x 0,75 m), et où 5 t ha-1 de Phospho-compost ont été appliqués autour des plants au tallage. Ce qui correspond à 25 kg P₂O₅ ha-1. L'urée ordinaire et l'urée marquée à 1%, à la dose de 30 kg N ha-1 ont été apportées en deux fractions au tallage et à la montaison respectivement sur les parcelles principales et les micro-parcelles.

Pour les technologies moyennes (B C et D), les parcelles sont constituées de trois lignes de 9,25 m de mil pur et quatre lignes de 9,25m de niébé pur pour les cultures continues, en rotation ou en bandes. En association, la ligne de niébé s'intercale entre deux lignes du mil avec une distance de 0,75 m entre les lignes qui ne sont pas interverties l'année suivante. La distance entre deux poquets dans les lignes est de 0,75 m. Les cultures en bandes ont été exclues de l'exploitation des données car, à cause de l'exiguïté des parcelles de 50 m², les bandes de mil et de niébé ne peuvent pas se répéter.

Technologie E ou Forte, avec une densité de 20 000 poquets ha^{-1} (1 m x 0,5 m); le Super Phosphate Simple (SPS) à la dose de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹, a été appliqué au poquet en semis. L'urée ordinaire ligne, au marqué au ¹⁵N à la dose de 50 kg N ha⁻¹ a été apportée en deux fractions au tallage et à la montaison. Les parcelles des cultures de mil et de niébé en cultures continues, rotation ou en bande de la technologie E, comportent trois lignes de 9,5 m de mil et trois lignes de 9,5 m de niébé. En association, une ligne de niébé s'intercale entre deux lignes du mil toutes distantes de 1 m entre les lignes et de 0,5 m sur la ligne.

Le dispositif expérimental est un carré latin en trois répétitions, en alternant les traitements D et E.

Evaluation de la contribution des fumures organo-minérales et du niébé à la nutrition azotée du mil

En vue d'évaluer la contribution des fumures organo-minérales et du niébé à la nutrition azotée du mil, le NPK marqué ¹⁵N à 1% a été appliqué au semis, sur les micro-parcelles du mil au niveau du traitement B. Dans le même cadre, l'urée marqué ¹⁵N à 1% a été appliqué sur le mil des micro-parcelles, au tallage et à la montaison, au niveau des traitements B, C et D. La partie aérienne de la plante des poquets centraux des micro-parcelles a été récoltée à la maturité physiologique. Les échantillons ont été séchés d'abord à l'air pendant 8 jours et à l'étuve à 60 °C pendant 72 heures, puis

pesés et broyés pour le dosage de l'azote total et des excès de ¹⁵N.

L'analyse isotopique des échantillons de plantes a été effectuée par le laboratoire de spectrométrie de masse des isotopes stables de l'Université de Floride. La quantification de l'azote issu du fertilisant a été mesurée sur la base de la méthode de dilution isotopique à partir du Ndff (la fraction de N qui provient de l'engrais), et du taux de l'engrais azoté appliqué selon les équations I, II et III définies par AIEA (2).

$$Ndff(\binom{0}{0}) = \frac{Exc\`{e}s\ isotopique\ en^{15}\ N\ dans\ la\ plante}{Exc\`{e}s\ isotopique\ en^{15}\ N\ dans\ l'\ engrais} \times 100$$

$$N \ r\'{e}colt\'{e} \ venant \ de \ l \ 'engrais = \frac{N \ de \ la \ r\'{e}colt\'{e} (kg \ l \ ha) \ x \ Ndff \left(\binom{0}{0} \right)}{100}$$
 (II)

$$Utilisation du \ fertilisant = \frac{N \ r\'{e}colt\'{e}\ venant\ de\ l'\ engrais}{N \ venant\ de\ l'\ engrais} \ x\ 100 \eqno(III)$$

Expression de l'accroissement du rendement (Indice %)

L'accroissement du rendement a été estimé en utilisant l'équation IV.

$$Taux d'accroissement = \frac{Rendement du traitement(kg ha^{-1})x 100}{Rendement du témoin kg ha^{-1}}$$
(IV)

Evaluation du Land Equivalent Ratio (LER)

L'association des cultures permet de rendre compte de l'utilisation efficace de la terre à travers la détermination du Land Equivalent Ratio (LER). Le LER (équation V) est défini comme la superficie relative des terres en culture pure nécessaire pour produire les mêmes rendements que la culture associée (35).

$$LER = \frac{Rendement\ du\ mil\ en\ association}{Rendement\ du\ mil\ en\ pur} + \\ \frac{Rendement\ du\ ni\acute{e}b\acute{e}\ en\ association}{Rendement\ du\ ni\acute{e}b\acute{e}\ en\ pur} \tag{V}$$

Il correspond à la somme des ratios de rendement (Land Equivalencies – LE) des deux cultures (culture associée/culture pure en continu, et a été calculé selon la formule VI de Mohammed (35).

On a alors:

LER = LE mil + LE niébé (Equation VI)

Analyses statistiques

Les effets des fumures organo-minérales, de l'association et de la rotation sur les rendements du mil, les taux de prélèvement, et le recouvrement de N, ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA), avec le logiciel Genstat version Discovery 4 (21). La séparation des moyennes a été effectuée par l'option contraste et le test de Duncan au seuil de 5% avec SPSS.

Résultats

Effet des fumures sur les rendements du mil

Le rendement moyen en graines de mil pour l'ensemble des systèmes de culture comparés a été de 135 kg ha-1 pour le témoin sans apport de fertilisants, contre 538, 533, 340 et 291 kg ha-1 respectivement pour les traitements E, B, C et D (Tableau 3). Ces résultats indiquent une différence très significative entre le témoin A (faible technologie) et les autres traitements (technologies moyennes (B, C, D) et forte (E)).

Les traitements E et B ont donné les rendements les plus élevés et ne sont pas statiquement différents. Mais ils sont significativement différents des traitements C et D qui eux, sont statiquement identiques. On observe un accroissement de rendement en graines par rapport au témoin de: 299, 295, 152 et 116 % respectivement pour E, B, C et D. Le rendement en tige du témoin est de 435 kg ha⁻¹ contre 1557, 1484, 1100 et 968 kg ha⁻¹ respectivement pour E, B, C et D, avec un taux d'accroissement dans le même ordre de 258, 241, 153 et 123 % (Tableau 3).

Effet des systèmes de cultures sur les rendements du mil

La rotation niébé-mil a eu un impact significatif sur les rendements du mil avec une production moyenne en graines de 452 kg ha-1 contre 321 kg ha-1 pour la culture continue du mil (Tableau 4). Cette rotation a induit un accroissement de 41% par rapport à la monoculture du mil. L'effet de la rotation a été observé au niveau de tous les traitements (Tableau 5), sauf au niveau du traitement B (NPK) pour la moyenne du rendement en graines.

Tableau 3

Variation des rendements en grain et tige de mil de l'ensemble des systèmes de cultures comparés en fonction des modes de gestion de la fertilité du sol.

Traitement	Grain kg ha ⁻¹	Indice %	Tige kg ha ⁻¹	Indice %
E	538a	399	1557a	358
В	533a	395	1484a	341
С	340b	252	1100b	253
D	291b	216	968b	223
Α	135c	100	435c	100
Traitement	***		***	

A: Témoin; B: NPK; C: PNT; D: Phospho-compost, E: SSP

*, ***, **** significatif au seuil de probabilité de 0,05; 0,01; <0,01; ns: non significatif (0,05). Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p=0,05 selon le test de Duncan.

Tableau 4Variation des rendements en grain et tige de mil en fonction des systèmes de cultures.

Culture	Grain kg ha ⁻¹	Indice %	Tige kg ha ⁻¹	Indice %
Rotation	452a	141	1370a	128
Association	329b	102	888b	83
Continu	321b	100	1068b	100
Culture	*		***	

*, **, *** significatif au seuil de probabilité de 0,05; 0,01; <0,01; ns: non significatif (0,05). Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p=0.05 selon le test de Duncan.

Tableau 5Variation du rendement en fonction des traitements et des systèmes de cultures.

Traitement	Rendement	Rotation	Association	Continue
E	Grain kg ha ⁻¹	551	687	375
	Indice %	147	125	100
D	Grain kg ha ⁻¹	589	409	600
В	Indice %	98	69	100
С	Grain kg ha ⁻¹	550	211	259
	Indice%	212	38	100
D	Grain kg ha ⁻¹	399	221	253
	Indice %	158	55	100
А	Grain kg ha ⁻¹	169	114	121
	Indice %	140	67	100

A: Témoin; B: NPK; C: PNT; D: Phospho-compost, E: SSP

Tableau 6Variation du Land équivalent Ratio (LER) en fonction des traitements.

Traitement	LER
Moyenne annuelle	1,46
Е	1,52
В	1,45
С	1,2
D	1,139
Témoin	0,56

A: Témoin; B NPK; C: PNT;

D: Phospho-compost, E: SSP

Tableau 7Effet des modes de gestion de la fertilité du sol sur le prélèvement de l'azote par le mil.

Traitement	N kgha ⁻¹	Ndffkg ha ⁻¹	Ndfs kg ha ⁻¹	% CRU
В	17,6a	3,83	13,72ba	8,5
С	19a	4,44	14,53a	12,06
D	12,3b	2,68	9,59b	7,79
Traitement	*	ns		ns

Ndff: quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs: quantité de N provenant du sol, CRU: coefficient réel de l'utilisation de N par la plante

B: NPK; C: PNT; D: Phospho-compost

 *,** , *** significatif au seuil de probabilité de 0,05; 0,01; < 0,01; ns: non significatif(0,05).

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p=0.05 selon le test de Duncan

L'urée marquée n'ayant pas été appliqué sur le traitement A, et E seuls les traitements B, C et D ont été analysés.

Tableau 8Effet des systèmes de cultures sur le prélèvement de l'azote par le mil.

Culture	N kg ha ⁻¹	Ndff kg ha ⁻¹	Ndfs kg ha ⁻¹	% CRU
Rotation	22,3a	4,74a	17,55a	12,83a
Association	11,3b	1,99b	9,34b	5,06b
Continue	15,2b	4,21a	10,96b	10,45a
Culture	***	**	***	**

Ndff: quantité de N provenant de l'engrais , Ndfs: quantité de N provenant du sol,

CRU: coefficient réel de l'utilisation de N par la plante

 $^{*, **, ***}$ significatif au seuil de probabilité de 0,05; 0,01; <0,01; ns: non significatif (0,05).

Les chiffres suivis de la même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p=0,05 selon le test de Duncan.

Toutefois, le rendement du mil en association (329 kg ha⁻¹) et celui du mil en culture continue (321 kg ha⁻¹) ne présentaient pas de différence significative. Le rendement en tiges du mil en rotation était de 1370 kg ha⁻¹ avec une augmentation significative de 28% par rapport au rendement de la culture pure (Tableau 4). Pour les tiges aussi, il n'y a pas eu de différence significative entre le mil en culture pure et le mil en association. Au niveau de la moyenne des traitements, l'association mil-niébé a enregistré un LER de 1,46. Selon les traitements, le LER a varié de 0,59 pour le témoin (Traitement A, faible technologie); à 1,52 pour le traitement E (Tableau 6). A l'exception du témoin, la valeur des LER est toujours supérieure à 1.

Impact des fumures organo-minérales et du niébé sur la nutrition azotée du mil

Les traitements B et C ont montré une meilleure utilisation (P<0,05) de l'azote (respectivement 19 et 17 kg N ha⁻¹) par rapport au traitement D (12 kg N ha⁻¹) (Tableau 7). La capacité des plantes à prélever l'azote du sol est également significativement plus élevée avec les Ndfs (Nitrogen derived from soil) de 14,53 et 13,72 kg N ha⁻¹ pour B et C, contre 9,59 kg N ha⁻¹ pour le traitement D. Aucune différence significative n'a été observée avec le coefficient réel de l'utilisation de l'azote qui était de 12,06% pour B; 8,5% pour C et 7,79 % pour D.

Effet des systèmes de cultures sur la nutrition azotée du mil

La rotation niébé-mil a permis une meilleure absorption de l'azote total et un meilleur prélèvement de l'azote du sol ne provenant pas de l'engrais minéral. En effet, la quantité totale d'azote absorbée par le mil en rotation a été de 22,3 kg N ha⁻¹ contre 15,2 et 11,3 kg N ha⁻¹ respectivement pour la culture continue du mil et le mil en association (Tableau 8). Pour ce qui est du prélèvement de l'azote ne provenant pas de l'engrais minéral, la rotation a permis prélèvement de 17,55 kg N ha⁻¹ contre 10,96 kg ha⁻¹ pour le mil en culture pure et 9,34 kg N ha⁻¹ pour le mil en association. Le coefficient réel de l'utilisation de l'azote a été de 12,83%; 10,45% et 5,06%, respectivement pour la rotation, la culture continue et l'association culturale.

Discussion

Effet des fumures sur les rendements du mil

Comparativement au niveau d'intensification témoin (A), toutes les technologies (fortes comme moyennes), ont eu un effet très significatif sur les rendements du mil, mettant ainsi en évidence l'effet positif de l'utilisation des engrais sur l'augmentation des rendements des céréales. Bien que les rendements ne soient pas très élevés à cause de la fertilité très faible du sol, l'accroissement du rendement par rapport au témoin était de 299, 295, 152 et 116% respectivement pour les traitements E, B, C et D. Ces résultats mettent également en évidence l'effet positif du phosphore et du compost (PNT et Phospho-compost, PC) dans l'amélioration de la disponibilité des nutriments pour les plantes (10, 49).

Le Super Phosphate Simple (SPS), engrais phosphaté soluble, utilisé à 30 kg ha⁻¹ de P_2O_5 dans la technologie forte, avec 50 kg N ha⁻¹ et une densité de semis de 1 m x 0,5 m, a donné les meilleurs rendements avec un accroissement des rendements de 299% pour les grains et 258% pour les tiges. Toutefois, cette technologie de SPS ne s'est pas traduite par des résultats significativement différents de ceux obtenus avec la technologie moyenne de NPK apporté au poquet, qui a induit une augmentation de 295% pour le rendement en grain, et 241% pour les tiges.

Le SPS a été appliqué par poquet car l'efficacité de l'utilisation des engrais par la plante dépend du mode d'application et l'apport par poquet est le plus efficient (12). Cependant, l'application du SPS au poquet s'est traduit par endroit en deuxième année, par un effet dépressif sur le développement végétatif des plantes, ce qui a dû affecter son rendement.

Les apports de la micro-dose de NPK (6 g de NPK apportés au poquet au semis) et de 30 kg N ha⁻¹ (appliqués en deux fractions) ont donné aussi un résultat positif. Cette technologie a induit une augmentation de rendements du mil et du sorgho de plus de 120% au Burkina-Faso, au Mali et au Niger (44).

La performance de la micro-dose de NPK, réside dans le fait que cet apport au semis donne un coup de starter à la plante. Il assure un bon développement racinaire, permettant une utilisation efficiente de l'eau et des éléments nutritifs. Ceci se traduit par une croissance rapide de la plante, la mettant ainsi à l'abri des stress hydriques de début et de fin de saison. Cette stratégie d'application de l'engrais au poquet est une opportunité pour les paysans; le coût de l'investissement en fertilisant minéral est en effet plus faible, et elle permet une augmentation sensible des rendements des céréales (14, 44).

L'apport du Phosphate Naturel de Tahoua (PNT) a induit également un accroissement significatif des rendements du mil, de 152 et 153% respectivement pour les graines et les tiges.

Le développement d'une approche intégrée de gestion des éléments nutritifs dans l'agriculture des pays en voie de développement, implique l'utilisation d'engrais minéraux et de sources naturelles d'éléments nutritifs, tels que les phosphates naturels (PN) (49). Comme les PN sont des matériaux relativement insolubles, la dimension des particules a une importance considérable sur leur taux de solubilisation dans le sol.

Plus la dimension des particules est petite, plus grand est le degré de contact entre le PN et le sol et, en conséquence, plus fort est son taux de dissolution. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de particules par unité de poids de PN appliqué, améliore les chances pour les poils absorbants de les rencontrer. Ainsi, l'application de PN finement broyés augmente le taux de sa dissolution et l'absorption du phosphore dans le sol. Cependant, en raison de leur nature pulvérulente, l'application de matériaux finement broyés est source de difficultés pratiques. En Afrique occidentale, les agriculteurs se sont plaints d'avoir reçu en épandant le PN finement broyé, du produit dans les yeux et ils ont ressenti une sensation de brûlure (49).

En outre, il est difficile quand il vente, d'appliquer uniformément les doses recommandées, particulièrement si cela se fait à la volée. Pour lever la contrainte liée à l'aspect pulvérulent, le PNT a été appliqué au poquet.

Le PNT fait partie des PN reconnus aptes pour une application directe en agronomie (11).

Il a été trouvé que l'efficacité agronomique de l'utilisation du PNT sur le rendement de mil était de 76% par rapport à celle du Super Phosphate Simple (SPS), tandis que celle du PN du parc du W, était de 48% (10). De nombreuses études ont été conduites ces dernières années sur l'utilisation des phosphates naturels en agronomie (3, 10, 15, 19, 49). Des expérimentations sur l'application localisée de PN et à la volée, associée au P soluble, ont été conduites dans plusieurs pays (Burkina Faso, Mali, Niger et Sénégal), et des résultats prometteurs ont été obtenus (15).

L'apport du Phospho-compost a aussi conduit à des résultats significativement différents du témoin. Le traitement des PN avec des matériaux organiques et leur compostage, pourrait être une technique prometteuse pour augmenter la solubilité des PN et la disponibilité de P pour les plantes (33, 49). Les produits compostés avec des PN sont habituellement désignés sous le nom de phosphocomposts (49). Cette technologie de phosphocompost a permis d'obtenir une augmentation de 116% pour le rendement en graine, et 123% pour le rendement en tige. Le processus de compostage est un procédé qui permet de valoriser les résidus de récolte et le fumier en mettant à la disposition de la plantes des éléments nutritifs facilement assimilables. Le PNT à été ajouté au compost lors de sa préparation, car l'incorporation des PN et de pendant le compostage l'azote permettrait d'améliorer la qualité et la biodégradation des composts (15, 33).

Les rendements obtenus sont relativement faibles, mais auraient dû être plus élevés. Les travaux de Lompo ont montré que la production de matière sèche et la quantité de phosphore exportée par le mil sont améliorées en présence de phosphocomposts (32).

Dans le cas de la présente étude, la durée de compostage relativement courte (moins de deux mois), n'a pas permis aux tiges de mil de bien se décomposer, et cela a du être une contrainte dans l'expression du potentiel de cette technologie. Il faut toutefois signaler qu'il y a eu très peu de travaux publiés sur l'efficacité agronomique des phosphocomposts.

344

Effet des systèmes de cultures sur les rendements du mil

Le rendement du mil subséquent à une culture de niébé a présenté une différence significative par rapport aux rendements du mil en culture continue. L'effet positif de la rotation a été observé au niveau de tous les traitements; le PNT a tendance à donner le meilleur résultat, mettant ainsi en évidence le rôle du phosphore dans les rotations légumineusescéréales. La faible réponse du traitement E dans le système de culture, est probablement due à l'effet dépressif observé sur la végétation, suite à l'application du SSP au poquet. L'effet bénéfique de la rotation légumineuse-céréale sur les rendements de la céréale a été rapporté par plusieurs auteurs (7, 9, 11, 23, 42). Les légumineuses ont un potentiel d'amélioration durable de la productivité dans les systèmes de culture spécialement dans les pays en développement, où la productivité agricole est en baisse (37). L'impact positif de la légumineuse sur le rendement de la céréale subséquente est souvent attribué à la fixation de l'azote, à l'azote économisé sous la culture de la légumineuse et à la libération de l'azote qui provient de la décomposition des résidus de la légumineuse (6). Il a été suggéré que des facteurs autres que la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique peuvent être responsables des effets résiduels élevés des légumineuses car ces derniers ne peuvent pas être compensés par l'apport des engrais azotés (9, 11).

Les autres avantages des légumineuses qui ont été sont l'amélioration des propriétés biologiques et physiques du sol, la solubilisation des composés phosphatés non disponibles par les exsudations racinaires des légumineuses, conservation et la restauration de la matière organique, et le contrôle des maladies (9, 17). L'association céréales-légumineuses est la pratique la plus courante en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale où le niébé est le plus souvent cultivé avec le mil ou le sorgho (11). L'association des cultures couvre plus de 75% des terres cultivées dans les zones Soudano-Sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest et la stabilité de la production en année pluvieuse ou pas, constitue son avantage majeur (10).

Par ailleurs, l'utilisation efficace des ressources du milieu, la minimisation des risques d'échec de production, l'amélioration de la fertilité du sol et sa protection constituent les principales raisons pour lesquelles l'association des cultures est pratiquée. Il a été rapporté que l'association des cultures est plus productive que les cultures correspondantes en pur et que la culture intercalaire maïs-légumineuse a un potentiel de réduction du risque de l'échec, d'amélioration de la productivité et des revenus, et d'augmentation de la sécurité alimentaire dans les systèmes de production vulnérables (41).

De ce fait, il a été suggéré que ce système de cultures peut être une voie vers l'intensification écologique (41). D'autres études ont montré que la productivité dans ce système peut être améliorée en utilisant des variétés améliorées, des dates appropriées de semis, des densités de semis élevées, une fertilité améliorée des sols et des arrangements spatiaux appropriés (39, 48).

Ainsi, il a été rapporté que les arrangements de deux rangées de céréales avec deux rangées de niébé ou deux rangées de céréales avec quatre rangées de niébé seraient mieux indiqués que la pratique traditionnelle d'une rangée de céréale avec une rangée de niébé appliquée ici (39, 47).

Le land équivalent Ratio (LER) permet de rendre compte de l'efficacité de l'utilisation de la terre. Dans la présente étude, toutes les valeurs du LER, à l'exception de celle du traitement sans application de fertilisants, sont supérieurs à 1, indiquant l'efficacité de l'association.

Ainsi, la culture intercalaire, au niveau de la moyenne des traitements, a donné un avantage de 46% par rapport aux cultures en pur. Un LER de 1,67 a été trouvé pour la pratique traditionnelle, et un autre de 2,05 pour l'arrangement en deux rangées de chacune des cultures (48). Des LER qui varient de 1,1 à 2,4 et de 1,0 à 1,9 ont été rapportés selon les arrangements spatiaux (41). Toutes ces études indiquent des LER supérieurs à 1 prouvant ainsi qu'il est plus avantageux, pour peu qu'un seuil minimum de fertilité du sol soit atteint, de pratiquer l'association céréale-légumineuse par rapport à la monoculture. Le traitement avec le SPS pour lequel la densité de semis est la plus forte (1 m x 0,5 m) a présenté le LER le plus élevé égale à 1,52.

345

Il a été souligné que l'efficacité de l'association céréale-légumineuse augmente avec la densité de semis pour peu que le niveau de fertilité de celui-ci soit suffisant (39).

Contribution des fumures et du niébé à la nutrition azotée du mil

Les taux de prélèvement de l'azote par le mil avec les traitements B, C et D ont été relativement faibles dans ce sol sableux, lessivé et à très faible teneur en matière organique. Le traitement avec le PNT enregistré le taux le plus élevé d'absorption de l'azote (19 kg N ha⁻¹) suivi du NPK (17,6 kg N ha⁻¹), mettant ainsi en évidence le rôle que joue le phosphore sur le bon développement des racines permettant une meilleure absorption des éléments nutritifs (9). Le taux de prélèvement de l'azote du Phospho-compost (PC) (12,3 kg ha⁻¹) est relativement faible, mais cela peut s'expliquer par la relativement courte (deux mois) préparation du PC. Malgré l'ajout de PNT au moment de la préparation (ce qui est reconnu pour avoir un effet positif sur la décomposition), il n'y a pas eu amélioration de la décomposition des tiges de mil. Le PNT et le NPK ont ainsi induit un meilleur prélèvement de l'azote du sol que le PC.

Cependant, il n'y a pas eu de différence significative entre les traitements par rapport au coefficient réel de l'utilisation de l'azote. Il a été indiqué que les plus faibles valeurs de recouvrement de l'azote ont été trouvées en Afrique, à cause des facteurs limitant de croissance comme le manque d'eau, l'acidité du sol et la déficience en éléments nutritifs (18).

Des études ont également montré que le taux de recouvrement de l'azote est faible à cause des pertes importantes par volatilisation (14, 31).

Les taux de prélèvement de l'azote trouvés dans les systèmes de cultures que nous avons comparés sont aussi relativement bas. Le mil en rotation a conduit à une meilleure absorption de l'azote provenant de l'engrais minéral et à un meilleur prélèvement de l'azote du sol que la culture continue du mil.

Le précédent niébé a significativement amélioré le taux d'absorption et de prélèvement de l'azote du sol par le mil et ce quel que soit le traitement. Le traitement avec le PNT a induit le meilleur bilan azoté dans les systèmes de cultures.

Conclusion

Les différents modes de gestion de la fertilité se sont avérés tous plus productifs que la pratique traditionnelle. Les technologies B, C, D dites moyennes car utilisant de faibles quantités d'engrais et valorisant les sources naturelles d'éléments nutritifs, avec une densité de semis relativement élevée, ont donné de rendements appréciables. En tenant compte de tous ces aspects, ces technologies pourraient être abordables pour les paysans. L'application de PNT au poquet après le sarclage, peut être une technologie prometteuse pour l'utilisation des PN, car elle permet de lever la contrainte liée à leur aspect pulvérulent.

Le Land équivalent ratio (LER) enregistré avec les technologies testées est supérieur à 1, indiquant que celles-ci permettent donc une utilisation efficace de la terre. La rotation niébé-mil associée à technologies entrainé d'avantage а l'accroissement des rendements du mil, l'utilisation de la méthode isotopique de ¹⁵N a permis de mettre en évidence le rôle important que joue la rotation avec les légumineuses dans les systèmes de cultures céréales-légumineuses. Ces modes de gestion de la fertilité des sols associés aux systèmes de cultures à base de légumineuses, permettent une utilisation rationnelle de la terre et une meilleure mobilisation de l'azote du sol. Elles pourraient être recommandées comme modes de gestion intégrée de la fertilité des sols aux paysans.

Remerciements

Nos vifs remerciements vont à la Fondation Mcknight qui a financé ces travaux, et à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique qui nous a fourni l'engrais azoté marqué ¹⁵N et a pris en charge les analyses isotopiques. Nous exprimons également toute notre gratitude à l'INERA (Burkina Faso), l'IDR-UPB (Burkina Faso), l'INRAN (Niger), l'ICRISAT (Niger) et à l'Université Abdou Moumouni de Niamey.

Références bibliographiques

- Achieng J.O., Ouma G., Odhiambo G. & Muyekho F., 2010, Effect of farmyard manure and inorganic fertilizers on maize production on Alfisols and Ultisols in Kakamega, western Kenya, *Agric. Biol. J. North Am.*, 1,4, 430-439.
- AIEA., 2001, Use of Isotope and Radiation Methods in Soil and Water Management and Crop Nutrition IAEA Training Course Series 14. Vienna. 21-103.
- 3. AIEA., 2002, Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production. IAEA-TECDOC-1272. 2002-473.
- 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, Cah. Agric., 21, 225-234.
- Axmann H. & Zapata F., 1990, Stable and radioactive isotopes. In: Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Training course N°2. Hardarson G., (eds)
- Bado B.V., 2002, Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéennes et soudanienne du Burkina Faso. PhD Thèse, Université de Laval Québec, 184 p.
- 7. Bado B.V., Bationo A. & Cescas M.P., 2006, Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa), *Biol. Ferti. Soils*, **43**, 171-176.
- 8. Bado B.V., Lompo F., Bationo A., Segda Z., Sedogo M.P., Cescas M.P. & Mel V.C., 2012, Nitrogen Recovery and Yields Improvement in Cowpea Sorghum and Fallow sorghum Rotation in West Africa Savannah, *J. Agric. Sci. Technol.*, **2**, 758-767.
- 9. Bationo A., Ntare B.R., Tarawali S. & Tabo R.. 2002, Soil Fertility management and cowpea production in the semiarid and tropics, pp 301- 318. In: Fatokum C.A., Tarawali S.A., Sing B.B., Kormewa A.M. & Tanio M (Eds), Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production. Proceeding of World Cowpea Conference III IITA Ibadan Nigeria 4-8 sept 2000. 396 p.

- 10. Bationo A., Mokwunye U., Vlek P.L.G., Koala S. & Shapiro B.I., 2003, Soil Fertility management for Sustainable Land Use in the West African Sudano-Sahelian Zone, pp 253-292, In: M.P. Gichuru et al., (eds.), Soil Fertility Management in Africa: A Regional Perspective. Academy Science Publishers (ASP) TSBF-CIA. 306 p.
- 11. Bationo A., Kimetu J., Valanauwe B., Bagayoko M., Koala S. & Mokwunye A.U., 2011, Comparative Analysis of Current and Potential Role of Legumes in Integrated Soil Fertility Management in West and Central Africa pp 117-150; In: Bationo A. et al., (eds.), Fighting Poverty in Sub-Saharan Africa: The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Soil Management. Springer, New York London. 246 p.
- 12. Bationo A. & Waswa B.S., 2011, New Challenges and Opportunities for Integrated Soil Fertility Management ISFM in Africa pp 3-17. In: A. Bationo et al., (eds), Innovations as key to the Green Revolution in Africa – Vol .1 Springer, New York London. 866 p.
- 13. Bationo A., Waswa B., Abdou A., Bado B.V., Bonzi M., Iwuafor E., Kibunja C., Kihara J., Mucheru M., Mugendi D., Mugwe J., Mwale C., Okeyo J., Olle A., Roing K. & Sedogo M., 2012, Overview of long term experiments in Africa pp 1-26. In: A.Bationo et al.,(eds.), Lessons learned from long-term soil fertility management experiments in Africa. Springer Science + Business Media Drdrecht, 204 p.
- 14. Bonzi M., 2002, Evaluation du déterminisme du bilan de l'azote en sols cultivés du centre Burkina Faso: Etude par traçage isotopique ¹⁵N au cours d'essais en station et en milieu paysan. Thèse de Doctorat, Lorraine. 177 p.
- 15. Bonzi M., Lompo F., Ouandaogo N. & Sédogo P.M., 2011, Promoting Uses of Indegenous Phosphate Rock for Soil Fertility Recapitalisation in the Sahel: State of the Knowledge on the Review of Rock Phosphate of Burkina Faso pp 381-390. in: Bationo A. et al., (eds), Innovations as key to the Green Revolution in Africa – Vol. 1 Springer, New York London. 866 p.
- 16. Bray R.H. & Kurtz L.T., 1945, Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, **59**, 39-45.

- 17. Carsky R.J., Vanlauwe B. & Lyasse O., 2002, Cowpea rotation as a resource management technology for cereal-based systems in the savannas of West Africa pp 252-266. In: Challenges and opportunities for enhancing sustainabe cowpea production; Fatokum CA, Tarawali SA, Sing BB, Kormewa AM and Tanio, (Eds) Proceeding of World Cowpea Conference III IITA Ibadan Nigeria 4-8 sept 2000. 396 p.
- 18. Cleemput O.V., Zapata F. & vanlauwe B., 2008, Use of tracer technology in mineral fertilizer N management.

 Guidelines on nitrogen management in agricultural systems IAEA, Vienna, IAEA-TCS, 29,19-125
- 19. Coraf Action., 2011, Lettre d'information pour la recherche et le développement agricole en Afrique de l'Ouest et du Centre, **59**, 16.
- 20. FAO., 2003. Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne, 63.
- GenStat Discovery., Edition 4, 2007. VSN
 International Ltd., Hemel Hempstead, UK.
- Gnankambary Z., Zougmoré R., Lompo F & Sédogo P.M., Fiche technique: Technique de production et d'utilisation du compost. Laboratoire Sol-Eau-Plante INERA/Kamboinsé.
- 23. Hamidou Z., Mahamane S., Nacro H.B., Bado B.V., Lompo F. & Bationo A., 2014, Effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au sahel, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8,4, 1620-1632.
- 24. Henao J. & Baanante C., 2006, *Soil Nutrient Mining in Africa*. IFDC Report Final: Agricultural Production and Soil Nutrient Mining in Africa, 13.
- 25. Hillebrand W.F., Lundell G.E.F., Bright H.A. & Hoffman J.I., 1953, Applied inorganic analysis, 2d ed., New York, JohnWiley and Sons, Inc.
- 26. Houot S., Francou C., Lineres M. & Le Villio M., 2002. Gestion de la maturité des composts: conséquence sur leur valeur amendant et la disponibilité de leur azote. 1ère partie. Echo-MO no 34.
- 27. Huber G. & SChaub C, 2011: La fertilité des sols: L'importance de la matière organique. Guide des Amendements Organiques. 46 p.
- 28. INRAN, 1988, Fiche Technique 2.10: Fabrication du compost aérien. Fiche technique dans Technologie diffusables et transferables aux producteurs. Ly S.A., Bielders C.L., Duivenbooden V.N., Tassiou A., Gouro A.S. & Kumar K.A. (eds) Institut National de

- recherche agronomique du Niger et Institut International de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides.
- 29. IUSS Working Group WRB, 2014, World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Johnson A.K.C., 1995. Inventory and mining of local mineral resources in West Africa. In: Use of Phosphate Rock for Sustainable Agricultre in West Africa. Gerner H., & Mokwuneye A.U., (eds) International Fertilizer Developemnt Center. 21-40.
- 31. Laberge G., Haussmann B.I.G., Per A. & Høgh-Jensen H., 2011, Cowpea N rhizodeposition and its belowground transfer to a co-existing and to a subsequent millet crop on a sandy soil of the Sudano-Sahelian eco-zone, *Plant Soil*, **340**, 369-382.
- 32. Lompo F., 1993, Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso: Etudes des effets de l'interaction phosphates naturels-matières organiques. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale de Cote d'Ivoire. 263 p.
- 33. 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.
- 34. Manu A. & Salou M., Methodes d'analyses physiques et chimiques de sol au laboratoire des sols de l'INRAN. 96 p.
- 35. Mohammed S.A.A., 2012, Assessing the Land Equivalent Ratio (LER) of Two Leguminous Pastures (CLITORIA and SIRATRO) Intercropping at Various Cultural Practices and Fencing at ZALINGEI –Western Darfur State Sudan, *ARPN J. Sci. Technol.*, **2**, 11, 1074-1080.
- 36. Mokwuneye A.U. & Bationo A., 2011, Meeting the Demands for Plant Nutrients for an African Green Revolution: The Role of Indigenous Agromineral pp19-29, In: A. Bationo et al., (eds), Innovations as key to the Green Revolution in Africa Vol.1. Springer, New York London. 866.
- 37. Nandwa S.M., Obanyi S.N.& P.L. Mafongoya., 2011, Agro-Ecological Distribution of Legumes in Farming Systems and Identification of Biophysical Niches for legumes Growth. In: Fighting Poverty in Sub-Saharan

- Africa:The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Soil Management. Bationo A. & et al., Eds, Springer, New York London 1-26. 246
- Natatou I., Adamou Z., Ikhiri K., Boos A., Guille J., Rastegar F. & Burgard M., 2005, Caractérisation physico-chimique du phosphate naturel de Tahoua(NIGER), Ann. Chim. Sci. Mat., 30, 1, 67-76.
- 39. Olufajo O.O. & Singh B.B., 2002, Advances in cowpea cropping systems research 267-277. Challenges and opportunities enhancing for sustainable cowpea production, Fatokum C.A., Tarawali S.A., Sing B.B., Kormewa A.M. and Tanio, (Eds) Proceeding of World Cowpea Conference III IITA Ibadan Nigeria 4-8 sept 2000. 396.
- 40. Ouédraogo J., Ouédraogo E. & Nacro H.B., 2014, Effet de l'interaction entre des modes de gestion de fertilité et la macrofaune sur la productivité du niébé et du sorgho en zone nord soudanienne du Burkina Faso, Int. J. Biol. Chem. Sci., 8, 1, 104-114.
- 41. Rusinamhodzi L., Corbeels M., Nyamangara J. & Giller K.E., 2012, Maize-grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique, *Field Crops Res.*, **136**, 12-22.
- 42. Subbarao G.V., Renard C., Payne W.A. & Bationo A., 2000, Long-term effects of tillage, phosphorus fertilization and crop rotation on pearl millet-cowpea productivity in the west-African Sahel, *Expl. Agric.*, 36, **2**, 243-264.
- 43. Tabo R., Bationo A., Bruno G., Ndjeunga J., Marchal D., Amadou B., Annou MG., Sogodogo D., Sibiry Taonda J.B., Ousmane H., Diallo M.K. & Koala S,. 2007, Improving cereal productivity and farmers income using a strategic application of fertilizers in

- West Africa pp 201-208. In: Bationo A. & et al., (eds.), Innovations as key to the Green Revolution in Africa Vol .1, Springer, New York London 866.
- 44. Tabo R., Bationo A., Amadou B., Marchal D., Lompo F., Gandah M., Hassane O., Diallo M.K., Ndjeunga J., Fatondji D., Gerard B., Sogodogo D., JBS Taonda J.B.S., Sako K., Boubacar S., Abdou A. & Koala S., 2011, Fertlizer Microdosing and Warrantage or Inventory Credit Systems to Improve Food security and Farmers Income in West Africa pp 113-121. In: Bationo A. et al., (eds.), Innovations as key to the Green Revolution in Africa Vol. 1, Springer, New York London. 866 p.
- 45. Vanlauwe B. & Giller K.E., 2006, Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Agric. Ecosys. Environ.*, **116**, 34–46.
- 46. Walkley A. & Black A., 1934, Etude de la méthode Degtjareff pour le dosage de la matière organique, modification apportée au dosage de l'acide chromique, Soil Sc., 37, 29-38.
- 47. Woomer P.L. & Tungani J.O., 2003, Light availability within an innovative maize-legume intercropping system in Western Kenya, *Afr. Crop Sci. Conf. Proc.*, **6**, 42-46
- 48. Woomer P.L., Langat M. & Tungani J.O., 2004, Innovative Maize-Legume Intercropping Resultat in Above and Below-ground Competitive Advantages for Understorey Legumes, *West Afr. J. Appl. Ecol.*, **6**, 85-94.
- 49. Zapata F. & Roy R.N., 2004, Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable, FAO Bulletin Engrais et Nutrition Végétale N°13. 176 p.
- Z. Hamidou, Nigérienne, Ir., Chercheuse, Institut National de la Recherche Agronomique du Niger, Niamey, Niger.
- S. Mahamane, Nigérien, PhD, Chercheur, Institut National de la Recherche Agronomique du Niger, Niamey, Niger.
- W.A. Payne, American, PhD, University of Nevada, Dean, Professor College of Agriculture, Biotechnology and Natural Resources Director, Nevada Agricultural Experiment Station Fleischmann Agriculture Reno, Reno, Nevada, USA.
- M.P. Sédogo, Burkinabé, PhD, Directeur de Recherche, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Ouagadougou, Burkina Faso.
- F. Lompo, Burkinabé, PhD, Directeur de Recherche, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Ouagadougou, Burkina Faso.
- H.B. Nacro, Burkinabé, PhD, Enseignant-Chercheur, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du Sol, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.