

Evaluation de la technique de rotation niébé-mil améliorée avec du Phosphate Naturel de Tilemsi à différentes doses sur la productivité des sols et des cultures dans le Sahel : Cas de la région de Mopti

Traoré B.¹, Haïdara S.², Timbely D.¹, Touré M.S.M.¹, Témé B.¹, Maïga M.S.³

¹Institut d'Economie Rurale, BP.: 258, Rue Mohamed V, Bamako, Mali

*Adresse contact : E-mail : boureimatraore@gmail.com tel : 0022366762289
dommotimbely@hotmail.com

²Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée de Katibougou

³Faculté des Sciences et Techniques : Université de Bamako

E-mail : pamaiga@yahoo.fr

RESUME : Le mil est une des cultures principales de la région de Mopti en zone sahélienne du Mali. La pluviométrie et la faible fertilité des sols sont les principaux facteurs conditionnant le rendement de cette culture. La culture continue, pratiquée sans restauration de la fertilité du sol provoque une diminution rapide de la teneur en éléments nutritifs et une baisse du rendement du mil. La présente étude a pour objectifs de contribuer à la lutte contre la baisse de la fertilité des sols et les bas rendements du mil dans la région de Mopti. Pour atteindre ces objectifs, des tests de rotation niébé-mil améliorée avec du Phosphate de Tilemsi à différentes doses (300 et 600 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹) ont été réalisés en conditions réelles dans trois communes situées dans les trois zones agro écologiques de la région de Mopti sur une durée de trois ans.

La technique de rotation niébé-mil améliorée avec du Phosphate de Tilemsi à différentes doses (300 et 600kg.ha⁻¹.3ans⁻¹) permet d'améliorer le rendement grain niébé de 10 à 68 % par rapport au rendement grain du niébé seul. Les bénéfices réalisés sont nettement supérieurs à ceux du mil en culture continue, et varient de 7 à 80%. Ainsi, les arrières effets du PNT (300 et 600Kg.ha⁻¹3ans⁻¹) appliqué au niébé sur la culture du mil en deuxième et troisième années permettent d'accroître le rendement grains de mil de 29 à plus de 100%. Tandis que l'application du niébé seul accroît le rendement grain du mil de 20 à 47%. La valeur du pH du sol (très acide à acide) augmente en deuxième année, cette valeur baisse en troisième année avec les différents traitements de la rotation niébé avec apport du PNT dans l'ensemble des traitements. Ainsi, l'effet de la rotation légumineuse céréale couplé avec l'arrière effet du PNT apporté sur le niébé en tête de rotation constitue une technologie relativement simple et performante qui pourrait contribuer à améliorer la productivité du mil dans la région de Mopti.

Mots clés : niébé, mil, rotation, production, sol, cultures, Sahel, carbone organique.

ABSTRACT: Millet is a major crop in the Mopti region in the Sahel region of Mali. Rainfall and low soil fertility are the key factors affecting the yield of this crop. Continuous cultivation, practiced without restoring soil fertility causes a rapid decrease in nutrient content and yield reductions millet. This study aims to contribute to the fight against the decline in soil fertility and low yields of millet in the Mopti région. To achieve these objectives, cowpea-millet rotation tests improved with Tilemsi phosphate at different doses (300 and 600 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹) were carried out under real conditions in three communes in the three agro-ecological zones in the Mopti region over a period of three years.

The technique of cowpea-mil rotation advanced with phosphate Tilemsi at different doses (300 and 600 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹) improves the cowpea grain yield of 10 to 68 % compared to the yield of the single grain cowpea. The profits generated are significantly higher than millet in continuous culture, and vary from 7- 80 %. Thus, the effects of back PNT (300 - 600 Kg.ha⁻¹3years⁻¹) applied to cowpea on millet cultivation in second and third years allow increased millet grain yield of 29 to over 100 %. While the application of cowpea only increases the yield of millet grain 20-47 %. The value of soil pH (very acidic acid) increases in the second year, this value down in the third year with the different treatments of cowpea rotation with input PNT in all treatments. Thus, the effect of the grain legume rotation coupled with the rear end of the PNT made on the rotating head cowpea is a relatively simple and effective technology that could contribute to improving the productivity of millet in the Mopti region.

Keywords: cowpea, millet, rotation, production, soil, crops, Sahel, organic carbon.

1. Introduction

Le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols exigent l'utilisation des engrais organiques et minéraux. Cependant, les moyens économiques des paysans ne permettent pas des interventions reposant sur des investissements importants. Il devient alors nécessaire de mettre en œuvre des moyens naturels de gestion de la fertilité des sols, comme la fixation biologique de l'azote atmosphérique par les légumineuses dans un système de rotation des cultures. Le niébé est une espèce généralement efficace dans la fixation de l'azote grâce aux rhizobiums associés à ses racines. Il peut être introduit dans le système de rotation des cultures à base de mil pour améliorer la fertilité des sols et accroître les rendements. En effet, « l'alternance d'espèces différentes sur une même parcelle cultivée, suivant des successions simples et sans recherche de schémas de rotations pluriannuelles trop complexes et irréalistes, doit être considérée comme une priorité dans l'optique d'un maintien de la fertilité des terres »[1].

Des essais en station ont montré les avantages qu'il y a à adopter la rotation annuelle de culture pure de céréales et de culture pure de niébé ou d'arachide [2]. Les auteurs [3, 4] ont démontré que dans certaines conditions, les rendements des céréales peuvent quasiment doubler dans le système de culture en rotation par rapport à la monoculture continue de mil. Même si elle n'est conçue qu'au seul égard de la fertilité, une rotation culturale entretient des mécanismes autant profitables à la conservation des sols qu'au maintien de leur fertilité, dans la mesure où ces mécanismes influent favorablement sur la teneur en humus et la stabilité des agrégats. Son rôle anti - érosif sera cependant bien plus important si, en plus, on établit la meilleure couverture du sol dans le temps et dans l'espace.

La rotation mil-niébé fournit des rendements similaires à l'utilisation de 30kg N ha⁻¹ [2]. La culture continue de mil donne des rendements bas à toutes les doses de N par rapport au mil cultivé en rotation avec le niébé ou l'arachide. L'amélioration de la production dans la rotation peut être renforcée avec les engrais phosphatés [4]. L'application du phosphore (P) sur le niébé lui permet de mieux fixer l'azote (N) pour produire plus de biomasse. La fraction de P non absorbée reste disponible pour la culture suivante qui disposera aussi de plus de N (fixation).

Il ressort de ces différents travaux et études que les avantages de la rotation des cultures se résument à :

- mieux exploiter les éléments nutritifs du sol par des systèmes racinaires de

morphologies différentes (céréale à racines localisées dans les couches superficielles du sol, et niébé dans les couches plus profondes) et par des besoins différents des espèces en ces éléments ;

- enrichir le sol en azote par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique ;
- améliorer le taux de matière organique du sol, le pH, la porosité et la rétention de l'eau ;
- éliminer ou réduire des espèces parasites comme le *striga* ;
- améliorer la fertilité du sol par une source moins coûteuse, constituant de ce fait une alternative efficace.

Il n'est pas nécessaire d'enfouir les fanes du niébé pour bénéficier des effets positifs de la rotation. Les fanes et les gousses peuvent être exportées chaque année [4]. Les biomasses racinaires localisées dans le sol constituent l'apport essentiel en ce qui concerne la régénération ou l'accroissement de la fertilité. Le niébé est considéré comme relativement résistant à la sécheresse [5], mais il doit être cultivé à plus de 350 mm [2]. La zone d'étude, compte tenu des irrégularités pluviométriques, notamment l'existence d'années sèches très déficitaires, est pratiquement à la limite écologique d'utilisation de ce système de culture; mais ceci renforce son intérêt comme technique alternative.

La présente étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de la rotation niébé-mil améliorée avec du Phosphate Naturel de Tilemsi à différentes doses sur la productivité des sols et des cultures dans la région de Mopti en zone Sahélienne du Mali.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Présentation des sites d'étude

L'étude a été menée dans la région de Mopti. Les trois sites retenus pour l'expérimentation ont été le village de Koporo-pen situé dans la commune de Koporo-pen dans la zone agro-écologique du Séno, le village de Tougoumé dans la Commune rurale de Doucombo (sur le Plateau Dogon, et le village de Madiama dans la commune de Madiama dans la zone du Delta. L'expérimentation a été conduite dans des champs de brousse. Ces trois sites ont été choisis parce qu'ils sont à la fois représentatifs des trois zones agro-écologiques de la région de Mopti et accessibles. Les caractéristiques des sites sont les suivantes :

- les plaines de la commune rurale de Koporo-pen, dans le Séno, sont constituées de matériaux du continental terminal formés de

sable et de grés argileux coiffés d'une dalle cuirassée. L'ensemble du Séno est assez contrasté du point de vue type de sol ; on y distingue essentiellement trois types de sols : les sols légers sableux (50 %), les sols lourds argilo-limoneux (35 %) et les sols limoneux sableux (15 %) (DRSPR., 1992) ;

- comme le reste du plateau Dogon, la commune rurale de Doucombo est caractérisée par un relief très accidenté où les sols de culture sont rares, et ne représentent que 22 % de la superficie totale du cercle, le reste étant occupé par des affleurements rocheux. Les terres sont dégradées à cause de l'insuffisance de couvert végétal et des eaux de ruissellement [6];
- la commune de Madiama est située dans le Delta Central du Fleuve Niger en particulier dans le bassin sédimentaire du moyen Bani qui a été comblé par les alluvions du quaternaire. Selon les travaux de Badini [7], la série texturale des types de sol des unités morpho-pédologiques répertoriées comprend : sable, sable limoneux, limon gravillonnaire, limon-sableux, limon, limon-argileux et argile [6].

Le climat de la région est de type sahélien, il présente une saison sèche qui s'étend d'octobre à mai et une saison pluvieuse de juin à septembre. La pluviométrie, de 1977 à 2005 a été en moyenne de 468 mm, avec un minimum de 273 mm de pluie en 2002 et un maximum de 643mm [8]. La température moyenne annuelle est de 29,1°C. L'humidité relative annuelle moyenne est de 44% dont le maximum se situe aux mois d'août, septembre, octobre et le minimum aux mois de janvier, mars, avril. L'ensoleillement minimal est de six heures par jour en juillet, avec un maximum de 8 heures par jour au mois de février [8].

2.1.2. Matériel végétal

La variété de niébé utilisée est le *Gorom-Gorom* (Suvita 2) originaire du Burkina-Faso. Il s'agit d'une variété épurée à grains marron, et de grosseur moyenne. Le cycle est de 70-75 jours. La variété est adaptée à des zones de 300-800 mm de pluie et aux zones subhumides à pluviométrie de 1 000 à 1 500mm et certaines variétés montrent une résistance considérable à la sécheresse. En Afrique, le niébé est traditionnellement cultivé en association avec d'autres plantes telles que le mil ou le sorgho. En plus de la complémentarité que la légumineuse et la céréale jouent dans la diète alimentaire, l'association des deux cultures produit des avantages dans le contrôle des mauvaises herbes, la couverture du sol et sa protection contre

l'érosion et la dispersion des insectes. Le niébé comme les autres légumineuses joue un rôle important dans la fertilisation des sols grâce à la symbiose avec des souches de rhizobium qui permettent la fixation de l'azote atmosphérique. Cette fixation a lieu dans des nodules ou nodosités formés sous l'effet de l'infection des racines par les Rhizobium [9]. Si les conditions édaphiques sont satisfaisantes (température, pH, éléments nutritifs), le taux de fixation peut atteindre 150kg de N/ha et couvrir ainsi 80 à 90% des besoins en N de la plante.

Une variété locale de mil, *Pennisetum glaucum* (L.), bien adaptée à la zone, a été utilisée dans l'expérimentation.

2.2. Méthodes

2.2.1. Choix des paysans

Le choix des paysans collaborateurs a été fait en assemblée villageoise en juin 2005 en présence des agents du service d'encadrement technique local et de quelques membres de la Commission Régionale des Utilisateurs des Résultats de la Recherche (CRU). Les critères de choix du paysan étaient basés sur la disponibilité à mener les tests et à accepter les innovations d'une part et d'autre part à l'accessibilité du champ.

2.2.2. Installation des parcelles expérimentales

La variété de mil utilisée, *Pennisetum glaucum* (L.), est une variété locale de mil, bien adaptée à la zone. Elle a été semée à la deuxième et troisième année en 2006 et 2007 à la place du niébé. Le semis a été fait quand le sol était suffisamment humecté après une pluie d'au moins 15 mm. Le premier sarclage a eu lieu 15 jours après la levée tandis que le deuxième sarclage a été effectué 20 jours après le premier. Les autres sarclages ont été faits au besoin.

Le dispositif expérimental était constitué par des blocs randomisés avec trois traitements en quatre répétitions sur des parcelles élémentaires de 150 m² chacune, matérialisées par des repères. En première année, le témoin T₀ était une culture continue de mil, le T₁ était une culture pure de niébé, le T₂ était une culture de niébé avec apport de 300 kg.ha⁻¹ de PNT et le T₃ était une culture de niébé avec apport de 600 kg.ha⁻¹ de PNT. Le test a duré trois ans. Le mil a été semé à 1 m entre les lignes et 1m entre les poquets. Le semis était à 8 grains par poquet. Le semis a été démarré à raison de 2 à 3 plants par poquet, 15 jours après la levée. Le niébé a été semé à trois grains par poquet et ensuite démarré à deux plants 15 jours après la levée avec une densité de semis de 0,75m x 0,30m. Les semis ont été effectués après un labour à billons. En deuxième et troisième années le mil a été semé à la place du

niébé pour évaluer les arrières effets du niébé et du PNT sur le même dispositif. Les 3 traitements étaient les suivants :

T₀ = mil (témoin)

T₁ = niébé

T₂ = niébé + 300 kg.ha⁻¹ de PNT

T₃ = niébé + 600 kg.ha⁻¹ de PNT

Le dispositif utilisé à la station de Koporo-pen a été retenu pour le suivi du sol. Le sol sur ce site est de type sablonneux ; il est surexploité sans aucun apport. D'abord, 12 échantillons de sols ont été prélevés dans l'horizon 0-20cm au niveau de chaque traitement. Ensuite, ils ont été mélangés et, enfin, il a été tiré de ce mélange un échantillon moyen. Ainsi, un échantillon moyen pour chaque traitement a été prélevé à la fin de chaque récolte. La situation initiale par rapport aux indicateurs retenus (N, P, K, C) est supposée être la même pour l'ensemble des parcelles élémentaires situées sur le même champ, malgré la grande variabilité qui affecte les sols. Les analyses ont été réalisées au Bureau National des Sols (BUNASOL) à Ouagadougou, au Burkina Faso. Elles ont porté sur l'azote total, le phosphore total, le potassium total, le carbone (matière organique), et le pH du sol.

Le taux de l'azote total du sol a été déterminé à partir du principe suivant : le sol est minéralisé par l'acide sulfurique concentré, porté à l'ébullition en présence d'un catalyseur. Ainsi, l'azote contenu dans la matière organique se transforme en sulfate d'ammonium. L'ammonium est déterminé à l'aide de l'auto analyseur. Les nitrates présents dans la terre ne se transforment que partiellement en ammonium par cette méthode. Pour les sols à haute teneur en nitrate, il est préférable d'employer pour la minéralisation un mélange d'acide sulfurique et d'acide salicylique. Après avoir tracé la ligne de base et mesuré les hauteurs de pic de la gamme étalon, des blancs et des échantillons par rapport à cette ligne, les concentrations en azote des blancs et des échantillons ont été calculées à l'aide de la gamme à partir d'un appareil de type Technicon Industrial Systems [11].

Où $\% N = 0.01 * (a-b)$
 a = ppm N pour l'échantillon
 b = ppm pour le blanc
 Précision : 0,01 % près.

La détermination du phosphore total du sol a été réalisée à partir du principe suivant : le sol est minéralisé par l'acide de Fleischmann à la température de 140°C (avec des variations possibles de 120 et 160°C). Dans le minéralisât le phosphore est déterminé sur auto-analyseur en mesurant l'intensité du complexe bleu phosphomolybdique.

Après avoir tracé la ligne de base et mesuré les hauteurs de pic de la gamme étalon, des blancs et des échantillons par rapport à cette ligne, les concentrations en phosphore des blancs et des échantillons ont été calculées à l'aide de la gamme d'un appareil de type Technicon Industrial Systems [11].

Où $P \text{ total} = 100 (a-b)$
 a = ppm P mesuré pour échantillon
 b = ppm P mesuré pour le blanc
 Précision : 1 ppm près.

La détermination du potassium total du sol a été réalisée à partir du principe suivant : l'extraction par 0,1 M HCl donne une indication du K présent dans le sol sous forme soluble, du K au complexe absorbant et d'une partie du K fixé dans les minéraux. Pour être sûr que le sol est extrait par HCl 0,1 M, il faut compenser la quantité d'acide neutralisé par le sol (CaCO₃, dolomite). Ceci pourrait se faire par l'addition d'une plus grande quantité de HCl, ou par introduction d'acide oxalique. Par addition supplémentaire de HCl, probablement, plus de K serait extrait. Ceci est dû à une destruction plus rapide des minéraux par l'acidité initiale plus élevée. Par addition d'acide oxalique, la concentration en ion H⁺ reste constante pendant la période d'extraction et le Ca du CaCO₃ dissout se précipite sous forme de Ca-Oxalate. Ainsi, le calcul est le suivant :

K en mg/100 g de terre = (a-b)
 K₂O en mg/100g de terre = 1,2 (a-b)
 Où, a = ppm K mesuré pour l'échantillon ; b = ppm K mesuré pour le blanc
 Précision : 0,01 ppm près.

La détermination du Carbone organique du sol (Méthode Anne modifiée) a été réalisée à partir du principe suivant : le carbone dans le sol est oxydé par un mélange de dichromate de potassium et d'acide sulfurique, l'excès de K₂Cr₂O₇ par une solution contenant le Fe²⁺ sous la forme de sel de Mohr ou de sulfate de fer. L'acide phosphorique est utilisé pour complexer l'ion Fe afin d'obtenir un point de virage plus distinct. La différence en meq. Fe utilisé pour l'échantillon et pour l'essai à blanc permet de calculer le contenu de carbone dans le sol. Des analyses élémentaires ont montré que 97% du carbone dans le sol sont oxydes de cette façon. Le pourcentage de matière organique dans le sol peut être calculé sur la base du taux de carbone suivant la formule ci-dessous (Nelson and Sommers, 1982) [12]:

Où $\% C = 0,24 \times (a-b) \times (13/V)/g$
 a = volume versé pour le blanc
 b = volume versé pour l'échantillon
 V = volume versé pour le contrôle de la solution de Fe

G = poids de l'échantillon
 % MO = 1,72 x % C
 Précision 0,01 près.

A la maturité, le mil a été récolté suivant les traitements en utilisant 5 carrés de rendement de 16 m² soit 4 m x 4 m. Les épis récoltés ont été d'abord séchés au soleil pendant deux semaines, puis battus et, enfin, pesés.

L'analyse de la variance a été effectuée pour déterminer la différence entre les effets des traitements et le test de Duncan a été utilisé pour séparer les moyennes des différents traitements.

3. Résultats

3.1. Effet de la rotation niébé - mil avec apport de phosphate naturel de Tilemsi (PNT) sur la fertilité du sol.

- Effet sur la concentration en N, P₂O₅ et K₂O du sol

Les sols sont caractérisés par un taux très bas en azote (Tableau 1). Les taux d'azote sont peu différents dans l'ensemble des traitements, après la première année. En deuxième année, l'accroissement du taux d'azote par rapport au témoin a été de 10 % avec l'application de Niébé, de 15% avec le Niébé+300 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et de 20 % avec le Niébé+300 kgha⁻¹.3ans⁻¹de PNT. En troisième année, l'accroissement du taux d'azote

Tableau I. Concentration du sol en N, P₂O₅, K₂O dans la commune rurale de Koporo-pen (0 - 40cm).

Itinéraires techniques Eléments Fertilisants	Année	Mil (témoin)	Niébé	Niébé+300 kgha ⁻¹ .3ans ⁻¹ de PNT	Niébé+300 kgha ⁻¹ .3ans ⁻¹ de PNT
		N total %	2005	0,016	0,015
	2006	0,020	0,022	0,023	0,024
	2007	0,021	0,024	0,023	0,029
P ₂ O ₅ total ppm	2005	40,6	40,6	48,7	44,7
	2006	39,3	42,1	44,9	53,3
	2007	59,4	59,4	42,5	46,7
K ₂ O total ppm	2005	587,0	523,2	561,5	689,1
	2006	324	344	353	358
	2007	5,49	5,23	5,18	5,56

(Source : analyse de sol : BUNASOL 2005, 2006,2007)

- Effet sur la concentration en carbone total du sol

Les analyses de sol après la deuxième année de culture ont montré un accroissement du taux de carbone dans le sol (Figure 1) par rapport au Mil (témoin), de 5,34 % avec le Niébé, de 8% avec le

par rapport au mil (témoin) a varié de 14,2 % avec le Niébé, et de 38 % avec le Niébé+300 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹de PNT.

Le P₂O₅ a connu un accroissement dans les traitements de niébé avec fertilisant par rapport au niébé sans fertilisant en première année. En deuxième année, cet accroissement a été de 7 % (2,8ppm) avec le Niébé, 14,2 % (5,6ppm) avec le Niébé+300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et de 36,6 % (14ppm) avec le Niébé+300 kgha⁻¹.3ans⁻¹de PNT. Mais en troisième année, la quantité de P₂O₅ a montré un déficit de 28 % (16,9ppm) avec le Niébé+300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et de 21 % (12,7ppm) avec le Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹de PNT. Les quantités de P₂O₅ avec le Mil (témoin) et le Niébé sont restées voisines.

En première année, La quantité de K₂O dans l'ensemble des traitements du niébé a connu une augmentation par rapport au niébé sans fertilisant. De même en deuxième année, la quantité de K₂O a connu un accroissement de 6,17 % (20 ppm) avec le Niébé, 8,95 % (29 ppm) avec le Niébé + 300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT, et de 10,49 % (34 ppm) avec le Niébé+300 kgha⁻¹.3ans⁻¹de PNT. Mais en troisième année, la quantité de K₂O comme le P₂O₅ a diminué par rapport au mil (témoin) avec le Niébé, et le Niébé + 300 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT, tandis que ce taux a augmenté de 1,2 % (0,07ppm) avec le Niébé + 300 kgha⁻¹.3ans⁻¹de PNT.

Niébé + 300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et de 11 % avec le Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹de PNT. Le rapport C/N a été de 13 pour le Mil (témoin) et le Niébé, ce rapport baisse et prend la valeur 12 pour les traitements Niébé + 300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹de PNT; dans ces deux derniers traitements la minéralisation a été plus rapide. En troisième année, les analyses de sol ont

montré une diminution du taux de carbone dans l'ensemble des traitements par rapport à la deuxième année. Les taux de carbone du sol des différents traitements ont connu respectivement comme l'année précédente un accroissement par rapport au Mil (témoin) de 17,7 % avec le Niébé, de 14,2 % avec le Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et

de 16,8 % avec le Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT. La minéralisation a été très forte avec un rapport C/N égal à 11 pour le Mil (témoin) et le Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et de 12 pour le traitement Niébé et de 14 pour le Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT.

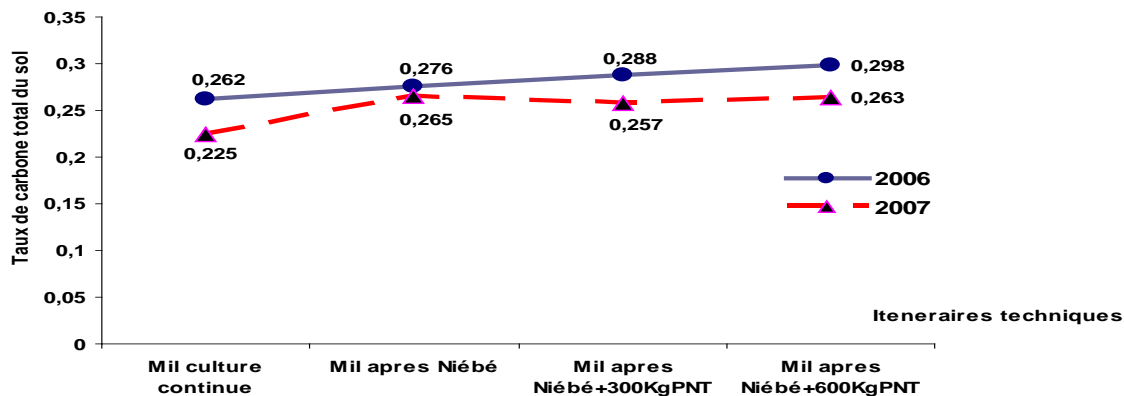


Figure 1. Variation du taux de carbone total du sol suivant les itinéraires techniques dans la commune rurale de Koporo-pen.

- Effet sur le pH du sol

Après la deuxième année, les analyses de sol ont révélé un pH acide pour l'ensemble des traitements. La valeur du pH a augmenté de 4,2 % pour le mil après niébé, 5,4 % pour le mil Niébé +300 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et de 5,6 % pour le Niébé +600 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT par rapport au pH du sol du Témoin. L'augmentation progressive de la valeur du pH traduit une diminution de l'acidité du sol avec les différents traitements de la rotation niébé avec apport du PNT (Figure 2). Les analyses de sol

ont montré que la valeur du pH baisse après la troisième année, ce qui indique que l'acidité des sols augmente dans l'ensemble des traitements, et elle a été plus élevée dans les traitements mil après Niébé avec un taux d'accroissement de 4,7 % et mil après Niébé +300 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT avec 5,9% par rapport au pH du sol de Témoin. Cette diminution de la valeur du pH traduit une augmentation de l'acidité du milieu qui serait due à la minéralisation de la matière organique (baisse du taux de carbone du sol).

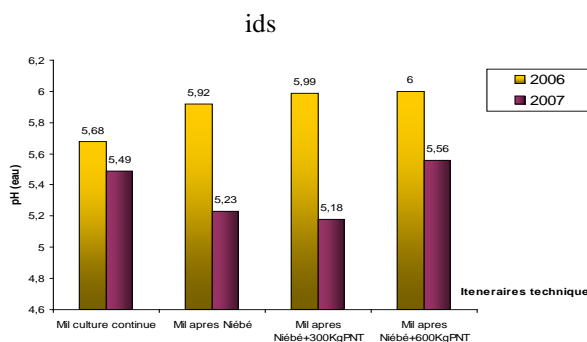


Figure 2. Variation du pH du sol suivant les itinéraires techniques pendant les deux dernières années 2006 et 2007 dans la commune de Koporo-pen.

3.2. Effets de la rotation niébé - mil avec apport de phosphate naturel de Tilemsi (PNT) sur les rendements moyens de pailles et grains de mil

L'analyse des résultats au seuil de 5% en première année, a montré qu'il n'existe pas de différence significative entre les rendements moyens (grains et paille) de niébé en tête de rotation (Tableau 2). Les rendements ont connu l'accroissement le plus élevé avec le niébé avec la dose de 600 kgha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT, avec 45 % (343 kgha⁻¹) en grain et 32 % (397 kg.ha⁻¹) en fane par rapport au Niébé en culture pure. Quant avec le niébé avec la dose de 300 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT, les taux d'augmentation étaient de l'ordre de 35 % (271 kg.ha⁻¹) en grains et 26 % (330 kg.ha⁻¹) en fane par rapport au Niébé en culture pure. La culture du niébé en tête de rotation en première année permet de réaliser beaucoup plus de valeur ajoutée que le mil en culture pure. La production par hectare connaît une progression et permet de réaliser beaucoup plus de bénéfice aussi bien avec le niébé seul, qu'avec le niébé et le PNT.

Tableau 2. Rendements moyens (grains et paille) niébé et mil témoin en tête de rotation en 2015.

Itinéraires techniques	Rendement (kg/ha)		Rapport grain/paille
	Paille	Grain	
Mil (Témoin)	5333	686	0,13
Niébé	1257	769	0,61
Niébé + 300kg ha^{-1} .3ans $^{-1}$ de PNT	1587	1040	0,66
Niébé + 600kg ha^{-1} .3ans $^{-1}$ de PNT	1634	1112	0,68

L'analyse des résultats au seuil de 5% en deuxième et troisième année, a montré qu'il n'existe pas de différence significative entre les rendements moyens (grains et paille) de niébé en tête de rotation (Tableau 3). Les rendements ont connu l'accroissement le plus élevé avec le niébé avec la dose de 600 kg ha^{-1} .3ans $^{-1}$ de PNT, avec 106 % (752 kg ha^{-1}) en grain et 76 % (2800 kg ha^{-1}) en fane par rapport au Niébé en culture pure. Avec le niébé plus la dose de 300 kg ha^{-1} .3ans $^{-1}$ de PNT, les taux d'augmentation étaient de l'ordre de 66 % (495

kg ha^{-1}) en grains et 73 % (2587 kg ha^{-1}) en fane par rapport au mil en culture pure. Quant avec le niébé seul, les taux d'augmentation étaient de l'ordre de 37 % (277 kg ha^{-1}) en grains et 49 % (1749 kg ha^{-1}) en fane par rapport au mil en culture pure. La culture du niébé en tête de rotation en première année permet de réaliser beaucoup plus de valeur ajoutée que le mil en culture pure. La production par hectare connaît une progression et permet de réaliser beaucoup plus de bénéfice aussi bien avec le niébé seul, qu'avec le niébé et le PNT.

Tableau 3. Rendements moyens mil (grains et paille) des deux campagnes 2016 et 2017

Itinéraires techniques	Rendement (kg/ha)		Rapport grain/paille
	Paille	Grain	
Mil (Témoin)	3 543	746	0,18
Mil après Niébé	5 292	1 023	0,18
Mil après Niébé + 300kg ha^{-1} .3ans $^{-1}$ PNT	6 130	1 241	0,20
Mil après Niébé + 600kg ha^{-1} .3ans $^{-1}$ de PNT	6 343	1 538	0,20

3.3. Évaluation du coût de production du mil au champs avec la rotation niébé-mil et Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT)

Le Tableau 4 indique le nombre d'hommes qui travaille par jour (homme/jour) pour les différents travaux. Il a été estimé à partir du nombre de travailleurs impliqués pour l'installation du test chez un paysan. Les valeurs obtenues ont été ramenées à l'hectare. Ainsi, de nombreuses

investigations ont été faites sur le terrain auprès des techniciens et des paysans pour aboutir à des données supposées raisonnables d'homme/jours par tâche. Quant au travail concernant la récolte, il a été évalué à 10 % de la valeur de la production.

Activités	Mil	Niébé
Labour (tous les ans)	2	2
Semis (tous les ans)	1	1
Sarclage 1 (tous les ans)	3,75	4
Sarclage 2 (tous les ans)	2,25	1
Epannage 300kg de PNT (1 ^{ère} année)	1,5	1,5
Epannage 600kg de PNT (1 ^{ère} année)	-	2
Traitement phytosanitaires (tous les ans)	-	1

(Source : enquête exploitations de Boureima Traore en 2005)

Les prix de vente du mil, du niébé au producteur varient d'une année à l'autre et dans la même année

les prix varient d'une période à l'autre. Ils sont les plus bas, juste après les récoltes et montent

progressivement pour atteindre le maximum vers le début de la campagne agricole suivante. Les investigations sur les marchés des différents sites ont permis de retenir le prix moyen de vente du mil à 140 F CFA.kg⁻¹ dans le Delta Central du Niger sur les trois ans et dans le Séno en première année, le

prix moyen de 130 F CFAkg⁻¹ sur le Plateau Dogon durant les trois ans et les deux dernières années pour le Séno. Le prix moyen de vente de grains de niébé utilisé dans les évaluations a été de 300 F CFA et celui des fanes a été de 125 F CFA pour l'ensemble des sites Tableaux 5.

Tableau 5. Prix (FCFA) du mil, du niébé, des intrants et quantité (Kg/ha) d'intrants.

Produits et intrants	Unité	Prix en F CFA	Quantité d'intrants par hectare
Mil (semence)	kg	225	5 kg.ha ⁻¹
Niébé (semence)	kg	450	20 kg.ha ⁻¹
PNT	kg	120	300-600 kg.ha ⁻¹
Traitements phytosanitaires	ha	12000	
Labour	½ ha	4000	
Autre main d'œuvre	h/jour	750	

(Source : enquête exploitations de Boureima Traore en 2005)

L'analyse économique des résultats a indiqué au tableau 6 que les coûts moyens de production du mil en rotation du niébé seul et du niébé avec différentes doses de PNT ont été supérieurs à celui du témoin. Ces différents coûts permettent de réaliser de la valeur ajoutée par rapport à la pratique paysanne. Ainsi, la culture du mil après le niébé et la dose de 600 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT vient en tête avec une augmentation de la valeur ajoutée de 144 % (soit 99 970 F CFAha⁻¹) par rapport à la culture continue du mil, de 60 % (soit 63 250 F CFA.ha⁻¹)

par rapport au Niébé seul et de 28 % (soit : 36 560 F CFA.ha⁻¹) par rapport au Niébé avec la dose 300 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT et . La culture du niébé avec la dose 300 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ de PNT, a procuré une valeur ajoutée de 25 % (soit 26 690 F CFA.ha⁻¹) par rapport au témoin et de 91 % (soit : 63 410 F CFA.ha⁻¹) par rapport au Niébé seul. La rotation après Niébé seul a engendré une valeur ajoutée de 53 % (soit 69 530 F CFA.ha⁻¹) par rapport au témoin de culture continue de mil.

Tableau 6. Rendements moyens (kg/ha), coût moyen de production (FCFA.kg⁻¹) et Bénéfices/pertes moyens (FCFAkg⁻¹)

Itinéraires techniques	Mil (témoin)	Niébé Mil	Niébé + 300 kg.ha ⁻¹ .3ans ⁻¹ de PNT Mil T ₂	Niébé + 600 kg.ha ⁻¹ .3ans ⁻¹ de PNT Mil T ₃
Rendement moyen grain (kg/ha)	725,9	1 023,0	1 240,8	1 538,0
Coût total de production	29 528	33 545	36 510	40 572
Bénéfices/Pertes	69 529	106 250	132 937	169 498

4. Discussion

Les analyses agronomiques et économiques des résultats ont montré que la pratique de la rotation avec le niébé en tête de rotation a été plus rentable que la culture continue de mil. Elle a permis de réaliser des bénéfices nets supérieurs à ceux du mil en culture continue. L'application du Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT) à différentes doses sur le niébé en tête de rotation a donné avec l'application de 600 kg.ha⁻¹de PNT, un taux d'accroissement du rendement grain variant de 7 à 80 %. Avec l'apport de 300 kg.ha⁻¹de PNT, le taux d'augmentation du rendement grain a varié de 10 à 68 % par rapport au rendement grain du niébé seul. L'augmentation du taux d'azote dans les grains par rapport au témoin a

varié de 106 % à 112 %. En ce qui concerne la paille, le taux d'azote a varié de 99,4% à 150%. Ces accroissements du rendement grains confirment les résultats de Veldkamp *et al.*, [13], selon lesquels l'expérience agronomique a montré un effet mesurable du Phosphate Naturel de Tilemsi dès la première année de son application sur la parcelle. Cet itinéraire technique peut être confronté à des difficultés, telles que le manque d'entretien des plants contre les insectes, le coût et le risque d'utilisation des insecticides. Cette dernière difficulté peut avoir sa solution avec l'introduction des extraits de grain de *neem* pour le traitement phytosanitaire. Le mil pourrait bénéficier d'effets

résiduels de N fixé par la légumineuse. Les gousses et fanes étant exportées du champ, ces effets proviendraient du système racinaire. Certains auteurs ont attribué l'effet bénéfique des rotations aux exsudats racinaires de certaines légumineuses à solubiliser le P [14]. En effet, les arrières effets sur la culture du mil en deuxième année de 600 kg.ha⁻¹ de PNT appliqué au niébé permettent d'accroître le rendement grains de mil de 45 à plus de 100 %. Avec l'arrière effet de l'application de 300 kg.ha⁻¹ de PNT, et du niébé, l'accroissement du rendement grains a varié de 29 à 70%. Quant à l'arrière effet du niébé seul sans fertilisant, le rendement grains du mil a croît de 5 à 47%. En troisième année, les arrières effets de 600 Kg.ha⁻¹ de PNT appliqué au niébé ont permis d'accroître le rendement grains à plus de 100 %. Avec l'application de 300 Kg.ha⁻¹ de PNT, et du niébé, l'augmentation de rendement grains peut varier de 75 à plus de 100 %. Quant à l'arrière effet du niébé seul sans fertilisant, le rendement grains peut atteindre 20 à plus de 100 %. Cette augmentation progressive du rendement en fonction de la quantité de PNT confirme les conclusions obtenues par Traoré *et al.*, 2000, selon lesquelles après une légumineuse telle que l'arachide ou le niébé fertilisée avec un engrais phosphaté, le mil bénéficie d'un arrière effet d'autant plus important que la fertilisation phosphatée de la légumineuse est plus élevée. Les bilans des éléments N, P₂O₅ et K₂O ont été déficitaires. L'application du Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT) à différentes doses sur le niébé en tête de rotation a permis d'obtenir une augmentation progressive de la valeur du pH, qui traduit une diminution de l'acidité du sol, de très acide à acide, avec les différents traitements de la rotation niébé avec apport du PNT en deuxième année. Mais en troisième année, l'acidité des sols augmente, de acide à très acide, dans l'ensemble des traitements, ce qui se traduit par la baisse des valeurs du pH. Ainsi, l'effet de la rotation légumineuse céréale couplé avec l'arrière effet du PNT apporté sur le niébé en tête de rotation constitue une technologie relativement simple et performante qui pourrait être utilisée par la plupart des paysans et contribuer à une amélioration significative de la productivité du mil et des systèmes de culture à base de mil dans les zones sahéliennes du Mali. Ces résultats satisfaisants obtenus par les effets résiduels de la rotation et de l'apport de PNT sont très importants au regard de la faiblesse des investissements requis. Ces technologies utilisées à grande échelle, pourraient contribuer d'une manière significative à l'autosuffisance et la sécurité alimentaire des populations dans les zones sahéliennes du Mali.

5. Conclusion

Les analyses agronomiques et économiques des effets des itinéraires techniques de la rotation niébé-mil améliorée avec du Phosphate de Tilemsi aux doses de 300 et 600 kg.ha⁻¹.3ans⁻¹ ainsi, que leurs effets résiduels, de un à deux ans après application, ont montré que la pratique de la rotation avec le niébé en tête de rotation a été plus rentable que la culture continue de mil. Ces itinéraires ont permis de réaliser des bénéfices nets supérieurs à ceux du mil en culture continue. L'application du Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT) sur le niébé en tête de rotation a donné en appliquant la dose de 600 kg.ha⁻¹ de PNT, un taux d'accroissement du rendement grains variant de 7 à 80 %. Ce taux, avec un apport de 300 kg.ha⁻¹ de PNT, a varié de 10 à 68% par rapport au rendement grains du niébé seul. L'augmentation du taux d'azote dans les grains par rapport à la culture continue du mil a varié de 106 % à 112 %. En ce qui concerne la paille, le taux d'azote a varié de 99,4 % à 150 %.

Le mil pourrait bénéficier d'effets résiduels de N fixé par la légumineuse. Ainsi, les arrières effets sur la culture du mil en deuxième année de 600 kg.ha⁻¹ de PNT appliqué au niébé ont permis d'accroître le rendement grains de mil de 45 à plus de 100 %. Avec l'arrière effet de l'application de 300 kg.ha⁻¹ de PNT, et du niébé, l'accroissement du rendement grains du mil a varié de 29 à 70%. Quant à l'arrière effet du niébé seul sans fertilisant, le rendement grains du mil a augmenté de 5 à 47%. En troisième année, les arrières effets de 600 kg.ha⁻¹ de PNT appliqués au niébé ont permis d'accroître le rendement grains à plus de 100%. L'application de 300 kg.ha⁻¹ de PNT, en présence du niébé, a entraîné une hausse du rendement grains de 75 à plus de 100 %. Le rendement grain peut atteindre 20 à plus de 100% avec, l'arrière effet du niébé seul sans fertilisant. Les bilans des éléments N, P₂O₅ et K₂O ont été déficitaires. L'application du Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT) à différentes doses sur le niébé en tête de rotation a permis d'obtenir une augmentation progressive de la valeur du pH, qui traduit une diminution de l'acidité du sol (qui est passée de très acide à acide) avec les différents traitements de la rotation niébé avec apport du PNT en deuxième année. Mais en troisième année, l'acidité des sols a augmenté en passant de acide à très acide dans l'ensemble des traitements. On en conclut que l'effet de la rotation légumineuse céréale, couplé avec l'arrière effet du PNT, apporté sur le niébé en tête de rotation, constitue une technologie relativement simple et performante qui pourrait être utilisée par la plupart des paysans, et contribuer ainsi à une amélioration significative de la productivité du mil et des systèmes de culture à base de mil dans les zones sahéliennes du Mali.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 années de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris : Agridoc-International. Ministère de la coopération et CIRAD-IRAT. 444p.
- [2] Bationo, A., F. Seyni, A. C. Buerkert, and C. L. Biellers. 1998. Rotation céréale - légumineuse, IN Technologies diffusables et transférables aux producteurs, (En Fr.), pp. 27-29.
- [3] Bationo A., et Vlek., P.L.G., 1997. The role of nitrogen fertilizer applied to food crops in the Sudano-Sahelian zone of West Africa. Journal of Agricultural Science, Cambridge 124, 39-44.
- [4] Klaij M.C, et Ntare B.R., 1995. Rotation and tillage effects a yield of pearl millet (*Pinnesetum glaucum*), and cowpea (*Vigna unguiculata*), and aspect of crop water balance and soil fertility in a semi-arid tropical environment Journal of agriculture science 124: 39-44.
- [5] Cissé. S et Gosseye. P.A., 1990. Compétition pour les ressources limitées : le cas de la cinquième région du Mali. Rapport 1. Ressources naturelles et population : AB -BLo/ESPR, AB-DLo. Wagening, 106 p + 66 p annexes.
- [6] DRSPR., 1992. Éléments de reconnaissance générale dans les zones du Séno et du Delta en 5ème région. (Département de la Recherche sur les Systèmes de Production Rurale), 27 pages.
- [7] Badini O., 2001. Etude morpho-pédologique de la commune de Madiama, cercle de Djénné, Mali : 29 pages.
- [8] Traoré S., 2005. Fiche technique des techniques culturales performantes pour de nouvelles variétés de mil 07. IER 6pages.
- [9] Touré Y. T., 1974. Fixation symbiotique de l'azote chez les légumineuses : mémoire de fin d'étude ENSup 90pages
- [10] Touré Y. T., 1974. Fixation symbiotique de l'azote chez les légumineuses : mémoire de fin d'étude ENSup 90pages.
- [11] Technicon Industrial Systems. 1977. Industrial method no. 334-74. Aust. J. Soil Res. 24:517-526 W/B+. Industrial/simultaneous determination of nitrogen and/or phosphorus in BD acid digests. Technicon Industiral Systems, Tar-rytown, NY.
- [12] NELSON D.W and SOMMERS L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter, 539-579 n A.L. Page et. al. Methods of Soil Analysis Part 2, 2" ed., Agronomy No. 9, American Society of Agronomy, Madison, W
- [13] Veldkamp W.J, Traore A, N'Diaye K, Keita M.K, Keita B, Bagayoko M., 1991. Fertilités des sols du Mali ; Mali Sud/ Office du Niger : Interprétation des données analytiques des sols et plantes 1991. IER, 149 p.
- [14] Bationo A., Ntaré B.R. 2000. Rotation and nitrogen fertilizer effects on pearl millet, cowpea and groundnut yield and soil chemical properties in a sandy soil in semi-arid tropics, West Africa. Journal of Agricultural Science, 134, p. 277-284.