

Table des matières

LISTE DES FIGURES III

LISTE DES TABLEAUX III

REMERCIEMENTS.....IV

SIGLES ET ABREVIATIONSVI

RESUME VII

ABSTRACTVIII

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LA FERTILISATION ORGANO-MINERALE DES CULTURES ET LA MICRODOSE DES ENGRAIS 4

1.1. FERTILISATION ORGANO-MINERALE DES CULTURES 4

1.1.1. IMPORTANCE DE LA FUMURE ORGANIQUE DANS LA FERTILISATION 4

1.1.2. EFFETS DE LA FUMURE MINERALE SUR LES CULTURES..... 5

1.1.3. FUMURE ORGANO-MINERALE 6

1.1.4. CONTRAINTES LIEES A L’UTILISATION DES FERTILISANTS EN AFRIQUE SUB-SAHARIENNE..... 6

1.2. MICRODOSE : DEFINITION, HISTORIQUE, ZONES D’APPLICATION, TECHNIQUE D’APPLICATION ET PERFORMANCES AGRONOMIQUES ET ECONOMIQUES 7

1.2.1. DEFINITION 7

1.2.2. RAPPELS HISTORIQUES SUR LA MICRODOSE EN AFRIQUE SUB-SAHARIENNE 7

1.2.3. ZONES D’APPLICATION DE LA MICRODOSE EN AFRIQUE SUB-SAHARIENNE 8

1.2.4. TECHNIQUES D’APPLICATION ET DOSES DE LA MICRODOSE 8

1.2.5. MICRODOSAGE DES ENGRAIS COMME MOYEN POUR BOOSTER LA PRODUCTION AGRICOLE..... 9

1.2.6. IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES DE LA TECHNOLOGIE DE MICRODOSE 10

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES D’ETUDE 11

2.1. SITE D’EXPERIMENTATION..... 11

2 .2. MATERIEL D’ETUDE 11

2.2.1. SOLS..... 11

2.2.2. MATERIEL VEGETAL 12

2.2.2.1. Le sorgho 12

2.2.2.2. Le fonio 13

2.2.3. MATIERES FERTILISANTES..... 14

2.3. METHODES D’ETUDE 14

2.3.1. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX 14

2.3.2.1. Essai sur le fonio 14

2.3.2.2. Essai sur le sorgho 15

2.3.3. ECHANTILLONNAGE DES SOLS..... 16

2.3.4. PARAMETRES MESURES..... 16

2.3.4.1. Croissance végétative et rendements du sorgho..... 16

2.3.4.2. Détermination de la biomasse du fonio..... 16

2.3.4.3. Rentabilité économique des traitements sur la production du sorgho 16

2.3.5. ANALYSES DU SOL 17

2.3.5.1. Détermination du pH du sol..... 17

2.3.5.2. Dosage du Carbone organique du sol 17

2.3.5.3. Détermination du phosphore assimilable du sol 18

2.3.6. ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES 18

CHAPITRE III. RESULTATS - DISCUSSION 19

3.1. EFFETS DES APPORTS COMBINES DE FUMIER ET D’ENGRAIS MINERAUX EN MICRODOSE SUR LA PRODUCTION DES CULTURES 19

3.1.1. RESULTATS..... 19

3.1.1.1. Effets des traitements sur la production du fonio 19

3.1.1.2. Effets des traitements sur la production du sorgho 22

3.1.2. DISCUSSION 28

CONCLUSION PARTIELLE..... 30

3.2. EFFETS DES APPORTS COMBINES DE MATIERE ORGANIQUE ET D’ENGRAIS MINERAUX SUR LES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU SOL..... 31

3.2.1. RESULTATS..... 31

3.2.1.1. Effets des traitements sur le pHeau du sol 32

3.2.1.2. Effets des traitements sur la matière organique du sol..... 32

3.2.1.3. Effets des traitements sur le phosphore assimilable 32

3.2.1.4. Relation entre le pH, les teneurs en MO, en P assimilable du sol et la biomasse du fonio..... 32

3.2.2. DISCUSSION 33

CONCLUSION PARTIELLE..... 34

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 35

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 37

ANNEXES 45

Liste des figures

Figure 1: Rôles de la matière organique dans le sol 4

Figure 2a: Apport de l’engrais en microdose au semis (Source : Palé, 2011)..... 9

Figure 3 : Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux en microdose sur la biomasse aérienne du fonio 20

Figure 4 : Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux en microdose sur la biomasse totale du fonio 20

Figure 5 : Effets des dates d'apport du NPK sur la biomasse aérienne du fonio 21

Figure 6: Effets des dates d'apport du NPK en microdose sur la biomasse totale du fonio 22

Figure 7 : Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur la croissance du sorgho à 50 JAS 22

Figure 8: Effets de la combinaison matière organique – engrais minéraux sur la croissance du sorgho au 60^{ème} JAS 24

Figure 9: Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur le rendement paille du sorgho 25

Figure 10: Effets de la combinaison matière organique – engrais minéraux sur le rendement grains du sorgho 25

Liste des tableaux

Tableau 1 : Doses de fertilisants apportées en vase de végétation sur le fonio 15

Tableau 2 : Traitements et doses de fertilisants apportées sur le sorgho..... 15

Tableau 3 : Effets de la combinaison de la matière organique et des engrais minéraux en microdose sur les paramètres chimiques du sol..... 31

Tableau 4: Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur les paramètres de rendement du sorgho 26

Tableau 5: Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur la rentabilité économique du sorgho 27

Tableau 6: Corrélations entre les propriétés chimiques du sol et la biomasse aérienne du fonio33

Remerciements

Un adage africain dit : « un seul doigt ne peut pas ramasser de la farine ». En effet, seule, je n'aurais pas pu porter à terme ce travail. Nombreuses sont les personnes et les structures qui ont œuvré à son aboutissement heureux. Je ne saurais, certes, faire une liste exhaustive de toutes ces bonnes volontés mais je tiens à témoigner ma profonde gratitude à tous. Aussi, voudrais-je remercier sincèrement:

- ☞ L'école doctorale de l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, la direction de l'IDR et tous les enseignants de cet institut pour notre formation ;
- ☞ Les responsables administratifs de l'INERA en particulier Dr. LOMPO François, directeur de L'INERA, Dr. BONZI Moussa, directeur du CREAM de Kamboinsé, Dr. OUATTARA Korodjouma, directeur régional de la recherche Scientifique et de l'Innovation du Centre-Ouest, pour m'avoir accueillie comme stagiaire au sein de cet institut ;
- ☞ Le projet CRDI/ACDI et tous ses responsables pour m'avoir octroyé une bourse d'étude et financé les travaux de recherche de ce mémoire
- ☞ Le Dr. SEDOGO P. Michel, directeur de recherches à l'INERA pour avoir accepté volontiers mon encadrement scientifique. J'ai été particulièrement touchée par son dévouement et sa vigilance pour me trouver une situation financière acceptable pour ces travaux et aussi pour sa disponibilité;
- ☞ Le Dr. OUATTARA Badiori, coordonnateur régional du projet CRDI/ACDI et co-encadreur de ce mémoire pour son dévouement, sa disponibilité, son souci permanent de l'avancement des travaux, ses conseils et l'encadrement tout simplement ;
- ☞ Le Pr SOME N. Antoine pour avoir accepté de co-encadrer ce mémoire en dépit de ses multiples occupations ;
- ☞ Mes aînés dans la recherche : Dr. PALE Siébou, Dr. KIBA Innocent, Dr. LOMPO Désiré Jean Pascal, Dr. POUYA Mathias, M. ZONGO Nongma Armel, M. SERME Idriss, M. SANON Bassirou, Mme KIBA Mariam pour leurs conseils, leurs encouragements et leurs apports combien précieux au document ;
- ☞ Tout le personnel du laboratoire Sol-Eau-Plante en particulier M. RAMDE Martin, M. OUANDAOGO Noufou, M. KABORE Jean Paul, M. MOYENGA Momini, M. OUEDRAOGO Alain, M. SAKANDE Ali, Mme PODA Léocadie, secrétaire du département GRN/SP, Mme OUEDRAOGO Antoinette, M. Fulbert BILGO;

- ☞ Tous mes camarades stagiaires en master ou ingéniorat : Minata SANOU, Mme SALIA Aïcha, Mme ZONGO Lydia, OUEDRAOGO Emeline pour la bonne collaboration et l'entraide mutuelle.
- ☞ Toute ma famille et tous mes amis ainsi que toutes les personnes que j'aurais involontairement oubliées de nommer pour leurs encouragements et leurs soutiens multiformes.

Que le Tout-Puissant comble chacun de vous au-delà de ses attentes et vous garde sous sa constante protection.

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Sigles et abréviations

ACDI : Agence Canadienne pour le Développement International

AFNOR: Association Française de Normalisation

ANOVA: Analyse de Variance

CAB: Chambre d'Agriculture de Bretagne

CIRAD : Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement

CRREA: Centre Régional de Recherches Environnementale et Agricole

CREAF : Centre de Recherche Environnementale, Agricole et de Formation

CRDI : Centre International de Recherches pour le Développement

CVF: Collection Voltaïque de Fonio

FAO: Fonds des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

IFPRI: International Food Policy Research Institute

ICRISAT: International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

JAS: Jour Après Semis

MAFAP: Monitoring African Food and Agricultural Policies

UA: Union Africaine

USAID: United States Agency for International Development

SAFGRAD: Semi-Arid Africa Agricultural Research and Development

Résumé

L'emploi des fertilisants organo-minéraux est l'une des recommandations nationales pour une production agricole durable au Burkina Faso. La technique de la microdose des engrais minéraux a été éprouvée et est en vulgarisation car permet une meilleure efficacité des engrais minéraux. Seulement on relève que cette technique porte uniquement sur la fertilisation minérale et ne tient pas compte des fumures organiques. L'utilisation bisannuelle de celle-ci en raison de 5 t.ha^{-1} s'est toujours avérée difficilement applicable pour la plupart des producteurs Burkinabé. L'objectif de cette étude est de déterminer les doses optimales combinées de matière organique et d'engrais minéraux en microdose sur la production des céréales et d'évaluer leurs effets sur quelques caractéristiques chimiques du sol. Pour ce faire, des études préliminaires ont été conduites en vase de végétation. Trois niveaux de fumier (0 , 5 et 10 t.ha^{-1}) ont été combinés à cinq doses d'engrais minéral (0 g , $1,5 \text{ g}$, 2 g , $2,5 \text{ g}$ et 3 g.poquet^{-1}) en quatre répétitions. Les résultats obtenus montrent que sur le plan agronomique, les combinaisons de 5 t.ha^{-1} ($160 \text{ g.poquet}^{-1}$) de fumier avec $1,5 \text{ g}$ ($46,88 \text{ kg.ha}^{-1}$), 2 g ($62,5 \text{ kg.ha}^{-1}$), $2,5 \text{ g}$ ($78,13 \text{ kg.ha}^{-1}$) et 3 g.poquet^{-1} ($93,75 \text{ kg.ha}^{-1}$) de NPK ont accru respectivement les rendements grains de 329% , 335% , 320% et 348% par rapport au témoin absolu, de 38% , 39% , 35% et 44% en comparaison à la fumure minérale exclusive et de 46% , 48% , 43% et 53% par rapport à la fertilisation organique seule. Les accroissements des rendements grains avec 10 t.ha^{-1} sont encore plus importants. Les propriétés chimiques du sol ont également été améliorées par les différentes combinaisons. Quant aux dates d'apport de l'engrais minéral, elles n'ont pas eu d'effets significatifs sur la production des cultures.

Mots clés : Microdose, matière organique, engrais minéraux, sorgho, fonio

Abstract

Combined application of organic and mineral fertilizers is one of the national recommended techniques for sustainable agricultural production in Burkina Faso. Microdose consisting in application of mineral fertilizer (NPK) in small quantities in the planting hill has shown better efficient use of fertilizer with an increase in crop yields and the technology is being scaled up in Burkina Faso. But, this technology was only applied on the mineral fertilization and does not take account to organic fertilization. The biennial use of the rate of 5 t ha⁻¹ of organic fertilizer (farmyard manure) is not affordable to small scale farmers. The objective of this study is to determine the optimal combined rates of microdose and organic fertilizer for cereal production and to assess the effects of these fertilizer combinations on soil chemical properties. To achieve this objective, a pot experiment was conducted with three levels of organic fertilizer (0, 5 and 10 t ha⁻¹) combined with five rates of NPK microdoses (0 g, 1.5 g, 2 g, 2.5 g and 3 g per planting hill), in four replications. Results indicated that, the combinations of 160 g of organic fertilizer per hill (5 t ha⁻¹) with 1.5 g NPK (47 kg ha⁻¹), 2 g NPK (62.5 kg ha⁻¹), 2.5 g NPK (78 kg ha⁻¹) and 3 g NPK per planting hill (94 kg ha⁻¹) increased respectively sorghum grain yield by 329%, 335%, 320% and 348% compared to control treatment with no fertilizer, by 38%, 39%, 35% and 44% in plots receiving only microdoses of NPK and by 46%, 48%, 43% and 53% in plots with organic matter alone. Grain yield increases were greater when 10 t ha⁻¹ of organic fertilizer combined with the different rates of mineral fertilizer NPK were applied on the plots. Soil chemical properties were improved by the different combinations. The timing of mineral fertilizer shows that this parameter does not influence the crop production.

Key words: Microdose, organic matter, mineral fertilizers, Sorghum bicolor, Digitaria exilis

Introduction

La plupart des sols de l'Afrique sont considérés comme étant les plus pauvres du monde en éléments nutritifs (Bationo *et al.*, 2012). En Afrique Subsaharienne, la pauvreté naturelle de ces sols est l'une des principales causes des faibles productions agricoles. En effet, ce sont des sols peu profonds avec une capacité de rétention en eau réduite et une disponibilité limitée en nutriments (Rabah *et al.*, 2011). Le Burkina Faso se situe dans cette partie de l'Afrique avec des sols particulièrement carencés en azote et en phosphore (Sédogo, 1993 ; Lompo, 2009 ; UA/SAFGRAD, 2010). Selon UA/SAFGRAD (2010), 75% des sols ont une teneur en azote total inférieure à 0,06% et 95% ont une teneur en P_2O_5 inférieure à 0,06%. Par ailleurs, le faible statut organique relevé par Elshout *et al.*, (2001) constitue également une contrainte majeure à la capacité productive de ces sols.

En outre leur dégradation, suite à des phénomènes naturels (érosion hydrique et/ou éolienne) et/ou anthropiques (mauvaises pratiques culturales), est d'autant plus contraignante pour l'agriculture burkinabé qu'elle contribue à les appauvrir davantage. Ce phénomène est exacerbé par la pression démographique (Rabah *et al.*, 2011). La baisse continue des teneurs en matière organique du sol (MOS) constitue également un facteur important des processus de dégradation des sols (Lal, 2008). Plus de 24% des sols cultivables du Burkina sont affectés par ce phénomène (UA/SAFGRAD, 2010). Cette dégradation en accentuant l'état de pauvreté des sols rend aléatoire leur productivité.

Par ailleurs, les engrais minéraux et la matière organique constituent d'importantes sources de nutriments pour les plantes. Cependant, ils sont peu utilisés par les producteurs. En effet, de nombreux auteurs indiquent que les quantités d'engrais minéraux utilisés dans l'agriculture des pays de l'Afrique Subsaharienne sont inférieures ou égales à 10 kg.ha⁻¹ (Buerkert *et al.*, 2001; Bado, 2002 ; Morris *et al.*, 2007, Vanlauwe *et al.*, 2010 ; Bagayoko *et al.*, 2011 ; Abdou *et al.*, 2012). Au Burkina Faso, la dose d'engrais minéraux utilisée en kilogrammes par hectare est passée de 10,95 en 2003 à 9,13 en 2009 (MAFAP, 2013). Concernant la fumure organique, 33,4% des superficies en recevaient en 2008 contre 21,6% en 2010 (MAFAP, 2013). Ces faibles doses seraient principalement liées au problème de disponibilité de la matière organique et à l'inaccessibilité aggravée par les coûts prohibitifs des engrais minéraux (Bado, 2002 ; MASSE, 2007 ; Somda, 2010 ; MAFAP, 2013). Bagayogo *et al.* (2011) estiment que les coûts réduits des produits agricoles sont également l'une des causes de la faible utilisation des engrais car ils réduisent le pouvoir d'achat des producteurs. Cette situation

entraînerait alors des bilans négatifs en éléments nutritifs, empêchant ainsi d'entretenir à long terme la fertilité des sols (Bado, 2002). Au Burkina Faso, le déficit en éléments nutritifs a été évalué à 14 kg d'azote, 2 kg de P_2O_5 et 10 kg de K_2O par hectare en 2000 selon le même auteur.

Face à de telles situations, il est urgent de développer des techniques de fertilisation accessibles aux producteurs et susceptibles d'accroître les rendements agricoles, tout en maintenant la fertilité des sols à long terme (Bado, 2002). C'est dans cette optique qu'un certain nombre de paquets technologiques a été développé. Parmi ces technologies, l'adjonction de la fumure organique à la fumure minérale joue un rôle prépondérant tant sur la production que sur le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols. Cependant, les contraintes concernant l'accès et les coûts de ces facteurs de production demeurent un frein à la mise en œuvre effective de cette technologie. Les doses appliquées, si elles le sont, atteignent à peine celles recommandées. En outre, le mode d'épandage des engrais (à la volée) préconisé par les institutions de recherche ne permet pas aux cultures de bénéficier du peu de nutriments apportés.

Aussi, la recherche d'une efficience d'utilisation des engrais chimiques et le souci d'alléger les charges des producteurs liées aux coûts de ces engrais ont conduit à la mise au point de la technologie de fertilisation par micro dose (Buerkert *et al.*, 2001 ; Bagayogo *et al.*, 2011) ou fertilisation localisée au poquet avec de faibles doses d'engrais (Hayashi *et al.*, 2007). De nombreux résultats de recherche ont mentionné des accroissements importants de rendements suite à l'application de la technologie de microdosage des engrais dans différents pays (Buerkert *et al.*, 2001 ; Twomlow *et al.*, 2008 ; Tabo *et al.*, 2008 ; Ferry, 2010 ; Bagayogo *et al.*, 2011). Palé *et al.* (2009) ont noté au Burkina Faso des gains de production sur le sorgho de plus de 140% avec la microdose comparativement à la pratique paysanne et de plus de 30% en comparaison à la fertilisation recommandée. Selon les mêmes auteurs, un complément en phosphore et en azote permet une meilleure production avec cette technologie, même dans des conditions de pluviométrie déficitaire. Il a été également montré qu'au Burkina le microdosage des engrais minéraux a entraîné une hausse significative des rendements du mil, du niébé, de l'arachide et du sorgho comparativement aux formules vulgarisées et aux témoins sans apport de fertilisants (Tabo *et al.*, 2006 et 2007 ; Palé *et al.*, 2009).

Cette technologie s'est avérée certes, performante en termes de productivité sur différents types de sol et de cultures. Toutefois, les investigations en la matière se sont davantage focalisées sur le microdosage des engrais minéraux seuls ou combinés avec une seule dose de matière organique (Abdoulaye and Sanders, 2005 ; Tabo *et al.*, 2006). C'est dire que très peu d'études en Afrique Subsaharienne et en particulier au Burkina Faso se sont intéressées à l'effet combiné de différentes doses d'engrais minéraux appliqués en microdose à plusieurs doses de matière

organique. La présente étude menée dans le cadre des activités de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) avec l'appui du projet « CRDI/ACDI » vise principalement à combler cette lacune par la détermination des doses optimales combinées de MO et d'engrais minéraux par microdose sur la production agricole. A partir d'expérimentations en vases de végétation sur le fonio et le sorgho, l'étude s'est fixée comme objectifs spécifiques de:

- ❖ Déterminer les effets de la combinaison de différentes doses de MO et d'engrais minéral complexe (NPK) par microdose sur les rendements des cultures;
- ❖ Evaluer les effets des apports combinés de MO et de l'engrais minéral par microdose sur quelques propriétés chimiques du sol après culture (Ct, Pass, pH) ;
- ❖ Déterminer la période optimale d'application de l'engrais minéral NPK par microdose sur la production des cultures.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons émis les trois hypothèses suivantes:

- ❖ Il existe des doses optimales de MO et d'engrais minéraux en microdose qui permettent d'accroître la production du sorgho et du fonio en comparaison aux apports organiques seuls ou à la fumure minérale exclusive en microdose;
- ❖ Les doses de fumure mixte MO-engrais minéraux par microdose améliorent les caractéristiques chimiques du sol en comparaison avec la fumure minérale seule et la fumure organique seule ;
- ❖ La période d'application du NPK influence la production des cultures;

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres : le premier chapitre fait l'état des connaissances sur la fertilisation organo-minérale des cultures et la technologie de microdose; Le second chapitre présente la méthodologie mise en œuvre pour réaliser l'étude. Enfin le troisième chapitre présente les résultats obtenus au cours de l'étude ainsi que les discussions qui en résultent.

Chapitre I. Généralités sur la fertilisation organo-minérale des cultures et la microdose des engrais

1.1. Fertilisation organo-minérale des cultures

1.1.1. Importance de la fumure organique dans la fertilisation

Les amendements organiques sont des pratiques anciennes dans l'agriculture. Ils consistent à apporter des sources de matière organique à des degrés de décomposition divers dans les champs. Variées dans leur nature et dans leurs formes les matières organiques assurent diverses fonctions (Duparque et *al.*, 2006 ; Pouya, 2008). On distingue en effet les résidus de cultures, le fumier, les déchets, le compost, les engrais verts etc (Pouya, 2008). Ces substrats organiques sont en lien avec toutes les composantes de la fertilité du sol (Duparque et *al.*, 2006). Chenu et Balabane (2001) ont su bien illustrer ces fonctions dans la figure 1.

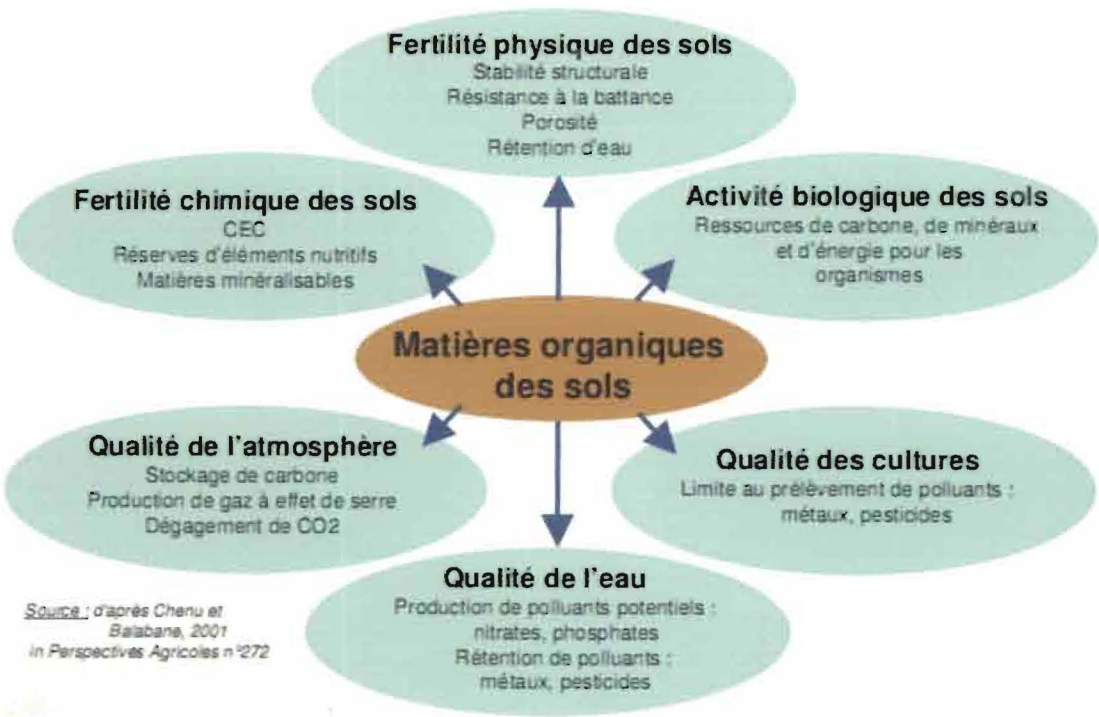


Figure 1: Rôles de la matière organique dans le sol

Il s'agit d'un triple rôle résumé comme suit par la chambre d'agriculture de Bretagne (CAB, 2011) : rôle énergétique, rôle physique, rôle nutritionnel. En effet, de par leur richesse en carbone et en hydrogène, les substances organiques libèrent par oxydation d'importantes quantités

d'énergie au profit des micro-organismes du sol (rôle énergétique). Concernant le rôle physique, lorsque des matières organiques (débris végétaux surtout jeunes) sont incorporés au sol, ils sont rapidement colonisés par les populations microbiennes. Les exsudats de ces organismes et leurs produits de dégradation agissent fortement sur les propriétés d'agrégation des sols (CAB, 2011). Les particules minérales adhèrent à ces produits et la structure du sol se trouve ainsi améliorée (perméabilité, aération, teneur en eau, prospection des racines). Sur le plan nutritionnel, les processus de minéralisation aboutissent à la libération des éléments structuraux qui composent les substances organiques tels que le phosphore et l'azote (CAB, 2011). En améliorant les différentes composantes de la fertilité des sols, la matière organique contribue à améliorer la production végétale. Tout comme les engrais minéraux, elle fournit une quantité importante d'éléments nutritifs aux plantes. Elle constitue la base aussi bien de la fertilité, de la conservation des sols que de la qualité des productions végétales (Pouya, 2008). Elle constitue également la base du succès des engrais minéraux dont elle augmente l'efficacité (FAO, 2003). Cependant, à elle seule, la fumure organique ne suffit pas car elle n'est pas souvent disponible pour assurer le niveau de production escompté par l'agriculteur (FAO, 2003). Elle doit être complétée par l'application des engrais minéraux.

1.1.2. Effets de la fumure minérale sur les cultures

Les éléments nécessaires à la plante viennent de l'air et du sol (FAO, 2003). Si le sol est carencé en un seul élément, la croissance des plantes se trouve limitée et les rendements réduits. Pour obtenir de bons rendements, il est nécessaire de fournir aux cultures les éléments nutritifs qui sont insuffisants dans le sol (FAO, 2003 ; Bado, 2002). C'est le rôle que joue la fertilisation minérale. Elle consiste à apporter des substances nutritives contenant un ou plusieurs éléments minéraux au sol en vue de couvrir les besoins des cultures. Les engrais minéraux sont connus pour leurs effets immédiats et bénéfiques sur la production des cultures. Cependant, plusieurs études ont aussi montré que la fumure minérale seule entraîne à long terme des effets néfastes sur les sols (acidification) et donc sur les rendements des cultures (Sédogo, 1993 ; Bado, 1994 ; Soltner, 2003). Par conséquent, ces auteurs recommandent davantage l'adjonction de ces engrais aux amendements organiques pour une gestion durable de la fertilité des sols et des productions agricoles acceptables.

1.1.3. Fumure organo-minérale

L'adjonction de la fumure organique à la fumure minérale en tant que mode de gestion durable de la fertilité des sols et des productions agricoles est bien connue. De nombreux travaux de recherche ont montré l'intérêt de leurs associations sur le maintien de la fertilité et les rendements des cultures (Sédogo, 1981 et 1993). En effet, les deux types de fumure se complètent dans leurs rôles (Bado, 2002 ; Vanlauwe et *al.*, 2001). La matière organique tout en améliorant les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol augmente l'efficacité des engrais minéraux qui assurent une meilleure alimentation minérale des plantes. Cela permet d'obtenir de bons rendements agricoles. Selon leur nature, les matières organiques fournissent une quantité importante d'azote (Bado, 2002) et d'autres éléments. Toutefois, ces intrants sont faiblement utilisés dans l'agriculture d'Afrique Sub-saharienne (Bado, 2002) et cela pour des raisons diverses.

1.1.4. Contraintes liées à l'utilisation des fertilisants en Afrique Sub-saharienne

Les engrais aussi bien organiques que minéraux sont fort peu utilisés dans l'agriculture en Afrique Sub-saharienne en général et en particulier au Burkina. Certains pays d'Afrique Sub-saharienne ont enregistré des hausses dans la consommation des engrais minéraux entre 1990 et 2008. D'autres au contraire durant la même période ont conservé des taux de consommation faibles compris entre 5 et 10 kg/ha (NEPAD, 2011). Ces taux réduits des engrais se justifient par deux principales contraintes très souvent soulignées par de nombreux auteurs. Il s'agit de l'inaccessibilité et des coûts de ces intrants. L'inaccessibilité à la matière organique se réfère à sa production limitée et à la quasi-absence d'intégration de l'élevage à l'agriculture. Tandis que dans le cas des engrais minéraux, leur rareté sur les marchés locaux ou leur approvisionnement difficile aux zones productrices les rendent indisponibles pour de grandes superficies. En outre, les coûts d'achat par rapport aux moyens dont disposent les producteurs sont trop élevés. Dans une telle situation, les acteurs du domaine agricole ne sont pas restés inactifs. Des technologies rentables aussi bien sur le plan agronomique que sur le plan économique ont été développées pour permettre non seulement de réduire les coûts des engrais mais aussi d'assurer une durabilité des productions. C'est le cas de la microdose des engrais.

1.2. Microdose : définition, historique, zones d'application, technique d'application et performances agronomiques et économiques

1.2.1. Définition

La microdose des engrais ou microfertilisation est une technique de fertilisation des cultures. Elle consiste à apporter de petites doses d'engrais minéraux dans les poquets de semis au moment des semis ou à côté des jeunes plants dix jours après le semis (Tabo et al., 2006 et 2007 ; Palé et al., 2009 ; FAO, 2012). C'est donc une technologie qui combine le mode d'apport et les doses d'engrais minéraux appliquées à une culture en vue de minimiser les coûts de production tout en améliorant les rendements et d'accroître ainsi le revenu agricole des petits producteurs.

1.2.2. Rappels historiques sur la microdose en Afrique Sub-saharienne et au Burkina

La zone sahélienne est confrontée à de nombreuses difficultés telles que la faible fertilité naturelle des sols, la forte baisse de la productivité des cultures suite à une exploitation minière des terres, l'inaccessibilité aux intrants, l'absence de technologies adaptées, les faibles pluviosités annuelles qui varient dans leur distribution spatio-temporelle et dans leur intensité (FAO, 2012). Au regard de l'ensemble de ces réalités, l'Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-arides (ICRISAT) et ses partenaires ont mis au point la technologie de microdose (FAO, 2012). De nombreuses parcelles de démonstration ont été alors mises en place au Niger dès 1999 par le Projet Intrants de la FAO, en collaboration avec l'ICRISAT (Palé, 2011 ; FAO, 2012). Par ailleurs, IFPRI (2008) précisent que la technologie de microdose a été entreprise entre 1994 et 1996 par l'ICRISAT, l'université de Hohenheim (Allemagne) et le Centre International de Développement des Fertilisants. Elle est vulgarisée à partir de 2004 à travers la mise en place de champs écoles. La technologie est diffusée depuis 2008 par le projet d'intensification de l'agriculture par le renforcement des boutiques d'intrants coopératives (FAO, 2012).

Au Burkina Faso, les expérimentations sur la technologie ont débuté en 2000 à travers des tests agronomiques sur le mil et le sorgho au centre régional de recherches environnementales et

agronomiques (CRREA) de Saria (Palé, 2011). A partir de 2002 jusqu'en 2006, ce sont des tests de démonstration en milieu paysan qui ont été conduits sur les mêmes cultures dans les régions du nord, du centre et du centre nord du pays par le projet USAID Target de fertilisation par microdose. Par la suite, des tests similaires sur les deux cultures précédentes et sur le niébé et l'arachide ont été mis en place de 2006 à 2008 à Nagréongo. Depuis 2009, Cette technologie sur le mil, le sorgho et le niébé est en phase de diffusion à grande échelle dans plusieurs villages de cinq provinces à savoir, le Boulgou, le Kouritenga, le Nahouri, l'Oubritenga et le Ziro (Palé, 2012). A ce jour, la microdose est adoptée par de nombreux producteurs. Le taux d'adoption de la technologie par les femmes a été étudié par Traoré (2013) au Zondoma et au Kouritenga. L'auteur indique que 43,3% de femmes productrices de niébé du Zondoma et de 18,9% dans le Kouritenga ont adopté la microdose.

1.2.3. Zones d'application de la microdose en Afrique Sub-saharienne

Cette technologie a été développée par l'institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT) en collaboration avec ses partenaires pour les zones à faibles pluviométries et à faible fertilité naturelle (FAO, 2012). Font partie de ces zones les zones sahélienne et soudano-sahéliennes du Burkina Faso. La microdose est donc applicable dans ces zones qui s'étendent des isohyètes 400 et 600 mm aux isohyètes 600 et 900 mm (Aune, 2007 ; Palé, 2011). Du moins, les expérimentations ont été réalisées dans ces zones pour l'instant et les zones à forte pluviométrie pourraient aussi faire l'objet de telles expérimentations.

1.2.4. Techniques d'application et doses de la microdose

L'application de cette technologie est assez simple et peut se faire, soit au semis, soit à la levée (figures 2a et 2b). Au moment des semis, déposer d'abord la dose d'engrais appropriée dans le poquet, le recouvrir d'une mince couche de terre, déposer ensuite la semence et refermer le poquet (Tabo et *al.*, 2006 et 2007 ; Palé et *al.*, 2009). La deuxième méthode consiste à semer au pied du jeune plant (10 jours après semis) la quantité d'engrais recommandée (Tabo et *al.*, 2006 et 2007 ; Palé et *al.*, 2009 ; JIRCAS, 2012). Les doses d'engrais minéraux sont généralement fonction des zones agro-climatiques (Coulibaly et Aune, 2007 ; Taonda et *al.*, 2008) et des cultures (UA/SAFGRAD, 2010). Au Burkina Faso, les doses de microdose sont de 2 g.poquet⁻¹ (62,5 kg.ha⁻¹) pour le sorgho et le niébé, 2 ou 3 g.poquet⁻¹ pour le mil respectivement pour des densités de semis de 80 cm x 40 cm et de 80 cm x 60 cm et 0,5 g.poquet⁻¹ pour l'arachide (Tabo et *al.*,

2006 et 2007 ; Palé et *al.*, 2009). La dose préconisée pour le maïs et qui reste à parfaire est de 4 g.poquet⁻¹ (Tabo et *al.*, 2006 et 2007 ; Palé et *al.*, 2009).

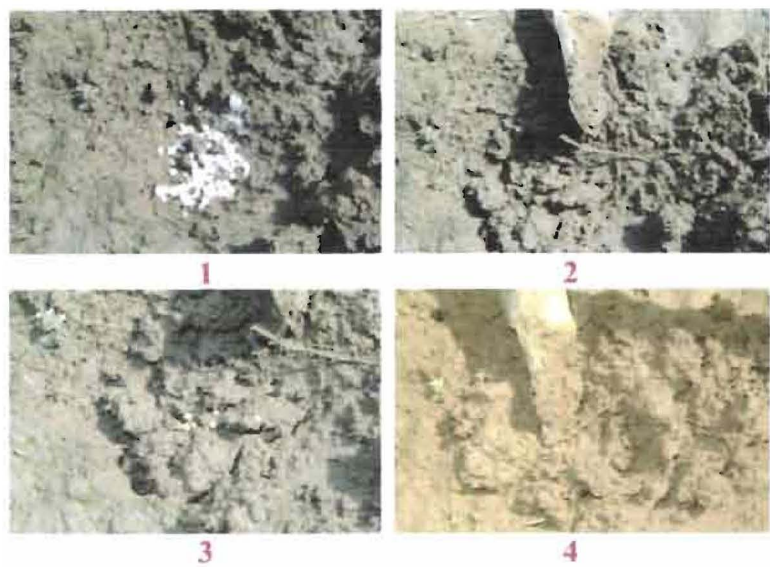


Figure 2a: Apport de l’engrais en microdose au semis (Source : Palé, 2011)

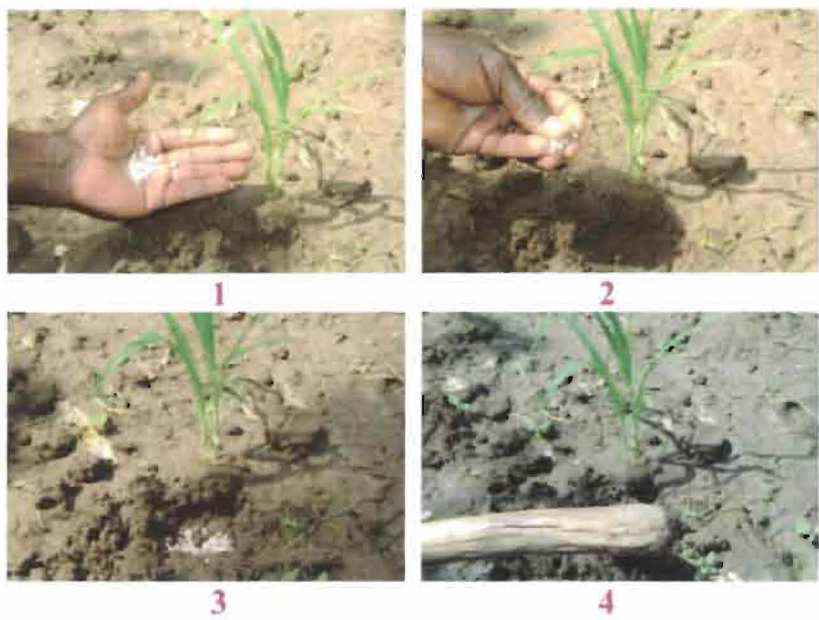


Figure 2b: Apport de l’engrais en microdose à la levée (source : Palé, 2011)

1.2.5. Microdosage des engrais comme moyen pour booster la production agricole

Les engrais minéraux appliqués dans le poquet ou à proximité des jeunes plants se concentrent fortement au voisinage de ces derniers, rendant ainsi plus aisée l’assimilation des éléments

nutritifs. La microdose permet également de minimiser les phénomènes de fixation du phosphore par le sol et les pertes par lixiviation de l'azote et du potassium en les mettant directement en contact avec les racines des plantes (Tabo *et al.*, 2006 et 2007 ; Palé *et al.*, 2009). Par conséquent, elle induit une croissance plus rapide des racines et des plantules ainsi qu'une maturité plus précoce des cultures permettant d'éviter les sécheresses de début et de fin de saison pluvieuse (Tabo *et al.*, 2006 ; Tabo *et al.*, 2007 ; Aune et Bationo, 2008; Palé *et al.*, 2009). Tout cela concourt à accroître l'efficacité des engrais minéraux utilisés et partant, à améliorer les rendements des cultures.

1.2.6. Impacts socio-économiques de la technologie de microdose

La technique de microdose permet de réduire de façon considérable les coûts de production par l'utilisation de petites quantités d'engrais et d'accroître le revenu des petits producteurs par l'augmentation des rendements (Tabo *et al.*, 2006 et 2007 ; Palé *et al.*, 2009 ; Traoré, 2013). Le revenu des producteurs a été multiplié par environ 2,5 sur le sorgho lorsque l'on passe de la dose vulgarisée à la microdose (Taonda *et al.*, 2008). Cette technologie peut également permettre une utilisation des engrais minéraux par de nombreux producteurs démunis et donc dans l'incapacité de se procurer les quantités nécessaires précédemment recommandées par la recherche.

Chapitre II. Matériel et methodes d'étude

2.1. Site d'expérimentation

Les essais expérimentaux ont été conduits en vase de végétation au centre de recherches environnementales, agricoles et de formation (CREAF) de Kamboinsé. Le CREAF de Kamboinsé est situé à 13 km au Nord de la ville de Ouagadougou avec pour coordonnées géographiques : 12°28' de latitude Nord et 1°33' de longitude Ouest.

2.2. Matériel d'étude

2.2.1. Sols

Le sol utilisé pour la mise en place des essais a été prélevé dans un champ paysan à Saria. Saria est situé au centre-ouest du Burkina Faso avec pour coordonnées géographiques 12° 16'N de latitude, 2° 9' de longitude et 300 m d'altitude.

Les sols de Saria sont classés parmi les lixisols ou sols ferrugineux tropicaux lessivés ou peu lessivés (Sédogo, 1993 ; Lompo, 2009). Ces types de sol représentent 39% des sols du Burkina (Lompo, 2009 ; Soma, 2010). Ces sols présentent des carences en phosphore et dans certaines conditions des déficiences en azote et potasse.

Leur profondeur variant entre 50 et 80 centimètres, est limitée par la présence de cuirasse concrétionnée. Les pentes sont en moyenne faibles : inférieures à 1% (Barro *et al*, 2009). Les travaux de Sédogo (1993) ont montré que la texture de l'horizon travaillé est sablo-limoneuse (en moyenne 55% de sable, 31% de limon et 14% d'argile). Ces sols sont également pauvres en matières organiques (< 1% en moyenne), en azote ($\approx 0,7 \text{ g.kg}^{-1}$) et en phosphore assimilable ($\approx 15 \text{ mg.kg}^{-1}$), et leur capacité de rétention en eau (CRE) est faible allant de 80 à 100 mm/m (Barro *et al.*, 2009). Ils s'acidifient rapidement sous les effets de la culture continue et des apports essentiellement d'engrais chimiques (Sedogo 1981, 1993).

Les analyses chimiques du sol utilisé pour les essais montrent des teneurs peu élevées en matière organique (0,74% de MO), en phosphore assimilable (5,11 mg/kg de sol) et un pHeau acide (4,96).

2.2.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé comprend deux céréales : le sorgho et le fonio.

2.2.2.1. Le sorgho

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) est une graminée annuelle d'origine tropicale de la famille des Poacées. Il est cultivé un peu partout dans le monde mais beaucoup plus dans les zones semi-arides d'Afrique et d'Asie. Sa hauteur à maturité varie entre 50 cm et plus de 5 m selon les variétés (Chantereau et Nicou, 1991). Il possède un système racinaire puissant pouvant s'enfoncer jusqu'à 2 m dans le sol. C'est ce qui explique sa capacité de résistance aux grandes périodes de sécheresse. Toutefois, ces racines sont concentrées dans les 90 premiers cm du sol (Soma, 2010). La tige de sorgho est accompagnée de talles issues du développement de bourgeons adventifs sur le collet. Le sorgho tolère aussi bien des sols lourds que des sols légers mais sa culture réussit mieux sur des sols limoneux ou limono-sableux. Il peut supporter un pH situé entre 5 et 8,5 (Soma, 2010). L'inflorescence est une panicule compacte ou lâche en fonction de la variété.

Le sorgho fait partie des céréales les plus cultivées dans le monde. Il occupe le cinquième rang mondial après le blé, le riz, le maïs et l'orge tant en termes de production que des superficies emblavées (Ferry, 2009). Du fait de sa rusticité, il constitue aujourd'hui un des piliers de la sécurité alimentaire pour plus de 100 millions d'Africains, en particulier dans les zones semi arides sahélo-soudaniennes d'Afrique de l'Ouest. Il entre dans la préparation de nombreux mets. Il sert à la fabrication de la bière locale ou dolo (Palé, 2012), mais également à l'alimentation du bétail (Ferry, 2009). En ce qui concerne la fertilisation du sorgho, cette céréale répond bien à la fumure minérale. Il est donc recommandé 100 kg.ha⁻¹ de NPK au 15^{ème} jour après semis et 50 kg.ha⁻¹ d'urée au 45^{ème} jour après semis. Quant à la fumure organique, la dose qui permet d'obtenir des rendements acceptables est de 5 t.ha⁻¹ de fumier bien décomposé ou de compost tous les deux ans.

Dans cette étude, nous avons choisi la Sariasso 14, variété améliorée à grandes potentialités agronomiques en zone soudano-sahélienne. Elle a un rendement grain potentiel de 5 t.ha⁻¹ tandis que le rendement en milieu paysan est de 1,7 t.ha⁻¹. Résistante à la sécheresse au stade post-floraison, la Sariasso14 possède une bonne vigueur à la levée. En outre, elle est assez résistante à la verse, aux maladies foliaires, aux moisissures des grains et est moyennement résistante à la cécidomyie et tolérante au striga. La plante en végétation atteint 1,90 m de hauteur. La panicule

est oblongue et semi-compacte avec des grains blancs et semi-vitreux. Le cycle semis-floraison est de 76 à 82 jours et le cycle semis-maturité de 110 à 115 jours.

2.2.2.2. Le fonio

Le fonio (*Digitaria exilis* Stapf) est une céréale traditionnelle endémique d'Afrique de l'Ouest (Vall et *al.*, 2011). Quelques travaux de recherche se sont intéressés à son origine, à la diversité et à la génomique des variétés locales (Adoukonou-Sagbadja et *al.*, 2006, Adoukonou-Sagbadja et *al.*, 2007, Adoukonou-Sagbadja, 2010 ; Dansi et *al.*, 2010). D'autres ont porté sur sa sensibilité à la photopériode (Aliero et Morakinyo, 2005) ou encore à la mécanisation du battage et du décorticage ainsi qu'à l'amélioration du séchage (Marouzé et *al.*, 2008 ; Cruz, 2009). Les recherches sur les techniques culturales et les systèmes de culture intégrant le fonio sont généralement rares et anciennes (Gigou et *al.*, 2009).

Le fonio revêt une grande importance pour l'Afrique de l'Ouest. En effet, il est cultivé dans une vaste région qui s'étend du Sénégal au lac Tchad (Cruz et *al.*, 2012, Bakasso et *al.*, 2010). Il fait partie des cultures de soudure qui luttent contre l'insécurité alimentaire saisonnière en Afrique Sub-saharienne (Vall et *al.*, 2011). Cruz et *al.* (2012) ont noté une production de 460 000 tonnes sur 517 000 ha avec un rendement moyen de 890 kg.ha⁻¹. 60% de cette production vient de la Guinée Conakry, pays le plus grand producteur (Kanfany, 2013). Au Burkina Faso, sa production a été estimée à 9 600 tonnes sur 13 000 ha (CIRAD, 2009). Le fonio est utilisé dans la préparation de plusieurs mets tels que le couscous, la bouillie etc.

Le fonio produit traditionnellement n'est pratiquement pas fertilisé. Mais depuis un certain temps, il est recommandé une fertilisation organique et minérale de cette culture. En effet, les rendements du fonio augmentent de 35% avec la fertilisation. Les doses de 30 kg.ha⁻¹ de complexe coton (NPK + urée) en sols riches et 50 kg.ha⁻¹ en sols pauvres au moment de la préparation du sol sont par conséquent recommandées. Cependant, les matières organiques telles que le fumier, les sous-produits agricoles et les engrais verts sont beaucoup conseillés comme alternative aux engrais chimiques en raison de leurs effets durables et peu nuisibles sur les sols et des avantages pécuniaires sur la culture.

La variété CVF (Collection Voltaïque du Fonio) qui est une variété améliorée au Burkina Faso est utilisée dans cette étude.

2.2.3. Matières fertilisantes

Le substrat organique utilisé est du fumier produit après stabulation à l'étable à la station de Saria. Il a une teneur moyenne en matière organique de 43,67% et un pH eau moyen de 8,74. Les engrais minéraux correspondent au NPK (14-23-14) et à l'urée (46% N).

2.3. Méthodes d'étude

2.3.1. Dispositifs expérimentaux

Deux dispositifs expérimentaux ont été mis en place en vase de végétation. Des pots de 150 cc et de 15 litres ont été respectivement utilisés pour le fonio et le sorgho. Le dispositif sur le fonio a permis de déterminer les effets combinés de la MO et des engrais minéraux et les effets des dates d'apport des engrais minéraux sur la biomasse végétale. De même, le dispositif sur le sorgho a permis de mesurer les effets combinés de la fumure organique et des engrais minéraux sur la biomasse et les rendements en grains. L'échantillon de sol ayant servi à la mise en œuvre des essais a été prélevé dans le village de Saria dans un champ paysan à plusieurs points, à la profondeur de 0-20 cm.

2.3.2.1. Essai sur le fonio

Le choix du fonio se justifie par le fait que :

- C'est une céréale à croissance rapide qui se prête à la coupe de la biomasse,
- On utilise de petites quantités de sol (280 g). Ce qui permet d'alléger le dispositif expérimental en vue de l'introduction plus aisée de différents facteurs à étudier (3 niveaux de MO x 4 doses d'engrais NPK x 3 dates d'apport de l'engrais minéral).

Au terme de la production de biomasse, les résultats issus de cette expérimentation sont applicables en valeur relative à une culture de sorgho. Le dispositif utilisé pour cet essai est un split split plot combinant 3 doses de MO (facteur principal), 5 doses de NPK (facteur secondaire) et 3 dates d'apport des engrais minéraux (au semis, au 10^{ème} et au 15^{ème} JAS comme facteur tertiaire). Les pots contenaient 280 g de sol. La fertilisation minérale effectuée à trois dates différentes a permis d'évaluer l'effet des périodes d'apport des engrais minéraux en microdose sur la biomasse du fonio. Les doses apportées dans les pots sont consignées dans le tableau 1. Compte tenu des petites quantités d'urée par traitement, cet engrais a été dilué et la solution obtenue a été apportée à l'aide d'une pipette dans chaque pot.

Tableau 1 : Doses de fertilisants apportées en vase de végétation sur le fonio

Formules de fumures en microdose	MO		NPK		Urée	
	g.pot ⁻¹	t.ha ⁻¹	mg.pot ⁻¹	en kg.ha ⁻¹	mg.pot ⁻¹	en kg.ha ⁻¹
0 MO x 0 NPK			0	0	0	0
0 MO x 1,5 NPK			16,88	46,88	8,44	23,44
0 MO x 2 NPK	0	0	22,5	62,5	11,25	31,25
0 MO x 2,5 NPK			28,13	78,13	14,06	39,06
0 MO x 3 NPK			33,75	93,75	16,88	46,88
5 MO x 0 NPK			0	0	0	0
5 MO x 1,5 NPK			16,88	46,88	8,44	23,44
5 MO x 2 NPK	1,6	5	22,5	62,5	11,25	31,25
5 MO x 2,5 NPK			28,13	78,13	14,06	39,06
5 MO x 3 NPK			33,75	93,75	16,88	46,88
10 MO x 0 NPK			0	0	0	0
10 MO x 1,5 NPK			16,88	46,88	8,44	23,44
10 MO x 2 NPK	3,6	10	22,5	62,5	11,25	31,25
10 MO x 2,5 NPK			28,13	78,13	14,06	39,06
10 MO x 3 NPK			33,75	93,75	16,88	46,88

2.3.2.2. Essai sur le sorgho

L'expérimentation appliquée au sorgho a nécessité de grandes quantités de sol (environ 17 kg par seau) pour simuler la production au champ. C'est ce qui justifie que le facteur date d'apport n'ait pas été pris en compte dans l'essai en vase de végétation sur le sorgho, de sorte à alléger le dispositif expérimental. Le dispositif expérimental est un split plot qui a combiné 3 doses de matière organique (0, 5 et 10 t.ha⁻¹ soit 0, 160 et 320 g.poquet⁻¹) et 5 niveaux de NPK (0 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 et 3 g.poquet⁻¹ soit 0 ; 46,9 ; 62,5 ; 78,1 et 93,7 kg.ha⁻¹). Chaque pot contenait 17,5 kg de sol et a été considéré comme un poquet. La matière organique a été apportée trois jours avant le semis puis les pots ont été suffisamment humidifiés (600 ml.pot⁻¹ soit environ 34 ml.kg⁻¹ de sol). Le NPK a été appliqué 10 JAS et l'urée 30 jours après l'apport du NPK. Les traitements sont consignés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Traitements et doses de fertilisants apportées sur le sorgho

MO (T.ha ⁻¹)	0					5					10				
MO (g.poquet ⁻¹)	0					160					320				
NPK (g.poquet ⁻¹)	0	1,5	2	2,5	3	0	1,5	2	2,5	3	0	1,5	2	2,5	3
Urée (g.poquet ⁻¹)	0	0,75	1	1,25	1,5	0	0,75	1	1,25	1,5	0	0,75	1	1,25	

2.3.3. Echantillonnage des sols

Le sol prélevé à 0–20 cm de profondeur a été tamisé à 0,2 mm pour les essais en pot de 150 cc. Après les récoltes, ces sols ont été totalement renversés puis tamisés pour les analyses chimiques.

2.3.4. Paramètres mesurés

2.3.4.1. Croissance végétative et rendements du sorgho

Les effets des différents traitements sur la croissance et les rendements du sorgho ont été évalués à travers la mesure des hauteurs des plants à 50 et 60 jours après semis (JAS) et la détermination des rendements grains et paille ainsi que la biomasse racinaire après la récolte à 113 JAS. Les mesures des hauteurs ont porté sur les mêmes plants choisis de façon aléatoire dans chaque poquet. Un plant par poquet a été mesuré du collet à la dernière feuille.

2.3.4.2. Détermination de la biomasse du fonio

Les biomasses aériennes et souterraines du fonio récoltées ont été séchées à l'étuve jusqu'à poids constant puis pesées pour obtenir la biomasse sèche.

2.3.4.3. Rentabilité économique des traitements sur la production du sorgho

La rentabilité économique est évaluée pour déterminer la combinaison économiquement efficace c'est-à-dire qui donne à la fois un rendement additionnel et un accroissement de gain monétaire acceptables. Elle correspond au rapport entre la valeur de la production totale et le coût de la fertilisation (Aune et *al.*, 2007). Ce rapport s'obtient par la formule suivante :

$$\text{RVC} = \text{Valeur de la production totale} / \text{Coût des fertilisants.}$$

Ce ratio permet d'identifier la combinaison optimale sur le plan économique. Selon Delville (1996), c'est le ratio le plus pertinent pour évaluer la rentabilité économique d'une technologie.

Si $\text{RVC} < 2$, la technologie n'est pas économiquement rentable. Le producteur enregistre une perte d'argent. Si $\text{RVC} = 2$, la technologie n'est pas rentable, mais il n'y a pas de perte d'argent. Le gain de rendement permet de couvrir tout juste les dépenses effectuées pour l'achat des fertilisants. Dans ce cas, la combinaison est sans intérêt économique. Si $\text{RVC} > 2$, la combinaison est considérée comme économiquement rentable. Elle permet au producteur de couvrir les dépenses et de dégager un bénéfice brut car les autres charges liées aux fertilisants ne sont pas pris en compte.

❖ Coûts des fertilisants

Les prix des fertilisants organiques comme minéraux sont fonction des régions et des marchés. Ils tiennent compte en effet des coûts de distribution et des subventions car certains engrais minéraux sont subventionnés. Notre étude prend en compte les prix locaux soit 10 FCFA.kg⁻¹ pour le fumier (Sanou, 2014) et 475 FCFA.kg⁻¹ pour le NPK et l'urée. Les prix des engrais minéraux sont les prix réels sans subvention.

❖ Prix du sorgho

Le prix du sorgho est également variable au cours de l'année et suivant les localités. A l'instar des autres produits agricoles, il n'existe pas de prix standard pour le sorgho au Burkina. Nous considérons ici le prix d'achat aux producteurs. Il est de 171,82 FCFA.kg⁻¹ pour les grains (Sanou, 2014) et 175 FCFA.botte⁻¹ de paille une botte pesant en moyenne 2,5 kg.

2.3.5. Analyses du sol

Les paramètres suivants ont été évalués : le pH, le carbone total et le phosphore assimilable du sol.

2.3.5.1. Détermination du pH du sol

Le pH du sol est mesuré dans un rapport sol/solution de 1/2,5. Cette mesure est faite avec de l'eau distillée pour le pH_{eau}. La mesure a été faite à l'aide de la méthode électrométrique. La méthode consiste à introduire dans un flacon 20 g de sol tamisé à 2 mm et à y ajouter 50 ml d'eau. Le mélange obtenu est mis en agitation pendant une heure conformément à la norme AFNOR (1981). Le pH est directement lu sur le pH-mètre HANNA à électrode en verre.

2.3.5.2. Dosage du Carbone organique du sol

Le carbone organique du sol a été dosé selon la méthode de Walkley- Black (Walkley and Black, 1934). Cette méthode consiste à oxyder à froid le carbone du sol à l'aide du bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) 1N dans un milieu acide sulfurique (H₂SO₄) concentré. La quantité de bichromate de potassium réduite est proportionnelle à la teneur en carbone du sol. L'excès de bichromate est titré par le sel de Mohr 0,5 N [Fe(SO₄)₂ (NH₄)₂] en présence d'un indicateur coloré (la phénophtaléine). La minéralisation du carbone avec l'acide sulfurique étant incomplète, les résultats sont exprimés en tenant compte d'un facteur de correction. Le pourcentage du carbone du sol est déterminé par la formule suivante:

$$C (\%) = ((V1-V2) \times N \times 0,3 \times 1,33) / P$$

V1 et V2 désignent les volumes de sel de Mohr utilisés respectivement pour le blanc (sans Carbone) et pour l'échantillon ; N = normalité du sel de Mohr et P = prise d'essai.

La teneur en matière organique est obtenue par la formule suivante :

$$\text{MO (\%)} = C \text{ (en g.kg}^{-1}\text{)} * 0,1724$$

2.3.5.3. Détermination du phosphore assimilable du sol

Le P assimilable (P_{ass}) est extrait selon la méthode Bray I (Bray and Kurtz, 1945) par une solution de fluor d'ammonium (NH_4F) 0,03 M et d'acide chlorhydrique 0,025 M dans un rapport sol/solution de 1/7. Le P extrait est déterminé par colorimétrie selon le principe suivant: le molybdate d'ammonium et le potassium antimoine tartrate réagissent en milieu acide avec des solutions diluées de phosphate pour donner un complexe qui, en présence de l'acide ascorbique est lui-même réduit en un complexe intensément coloré en bleu. L'absorbance de ce complexe (antimony-phospho-molybdate réduit) a été mesurée à 882 nm.

2.3.6. Analyses statistiques des données

Les données recueillies ont été saisies sur Excel. Les analyses statistiques ont été faites à l'aide du logiciel Genstat version 9.2. Les moyennes ont été comparées par le test de Newman Keuls au seuil de 5%.

Chapitre III. Résultats - discussion

3.1. Effets des apports combinés de fumier et d'engrais minéraux en microdose sur la production des cultures

3.1.1. Résultats

3.1.1.1. Effets des traitements sur la production du fonio

3.1.1.1.1. Effets sur la production de biomasse

Les figures 3 et 4 illustrent les résultats des apports combinés de la matière organique et du NPK sur la production de biomasse du fonio. On enregistre des valeurs de 167 mg à 892 mg.pot⁻¹ pour la biomasse aérienne et de 110 mg à 449,8 mg.pot⁻¹ pour la biomasse racinaire. Il ressort de l'analyse de variance que les différentes combinaisons n'ont pas eu d'effets significativement différents sur la biomasse aérienne (probabilité = 0,688). Toutefois, tous les traitements ont amélioré d'un point de vue arithmétique cette biomasse par rapport au témoin sans apport de fertilisants. En outre, toutes les combinaisons ont eu des valeurs de biomasse plus élevées que le NPK seul et la matière organique seule. La biomasse racinaire et celle totale ont par contre été significativement améliorées par les combinaisons par rapport au témoin sans apport, à la fertilisation minérale seule et aux amendements organiques seuls (figure 7 et annexe 3). Les meilleurs rendements s'observent au niveau des combinaisons avec 5 t.ha⁻¹ et 10 t.ha⁻¹ de MO avec les fortes doses de NPK (3 g, 2,5 g et 2 g.poquet⁻¹).

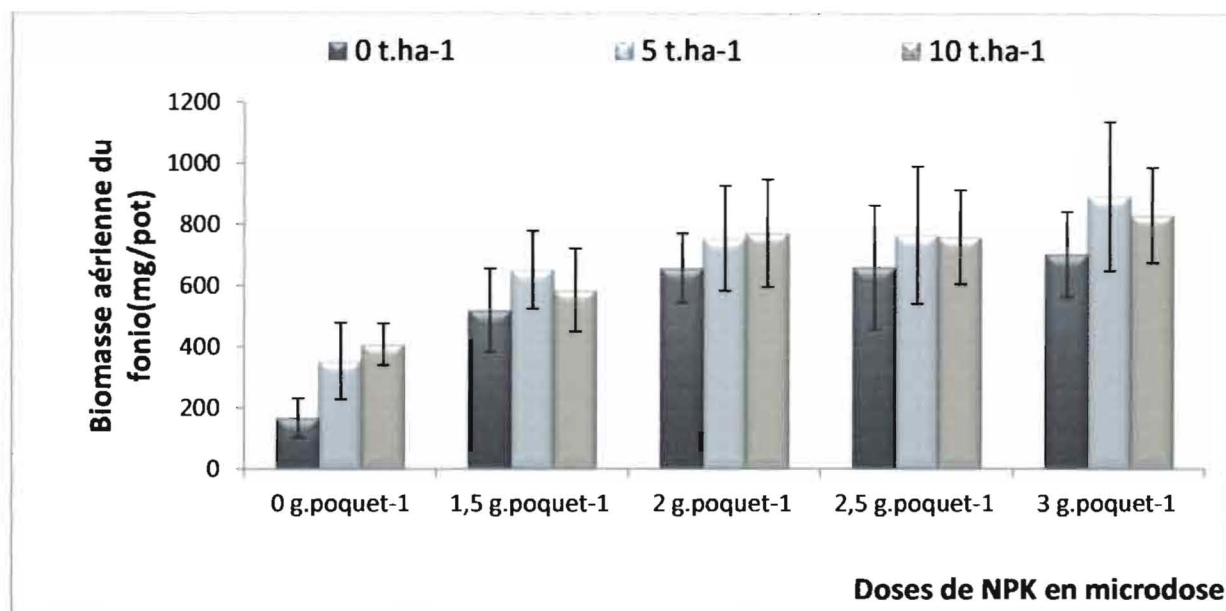


Figure 3 : Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux en microdose sur la biomasse aérienne du fonio

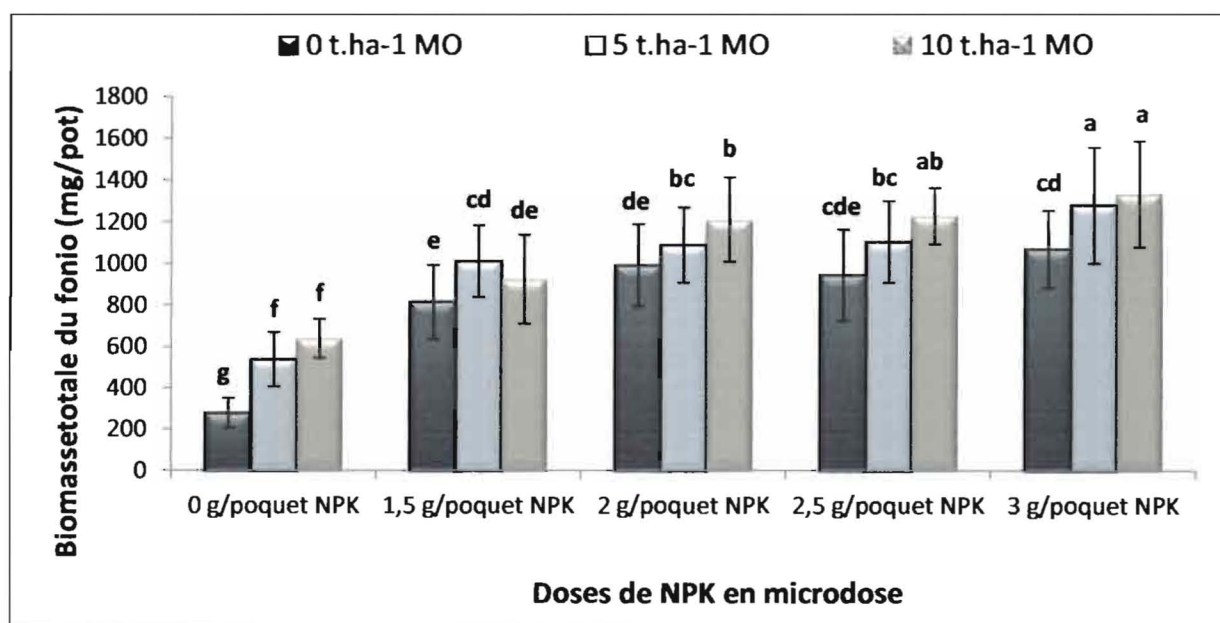


Figure 4 : Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux en microdose sur la biomasse totale du fonio

Les lettres au-dessus des barres indiquent la signification, les moyennes affectées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

3.1.1.1.2. Effets des dates d'apport des engrais minéraux sur la biomasse du fonio

L'apport du NPK à différentes dates n'a pas influencé significativement la production de la biomasse du fonio. En effet, quelque soit la dose considérée, la production de la biomasse est similaire aux trois dates d'apport de l'engrais (figures 5 et 6).

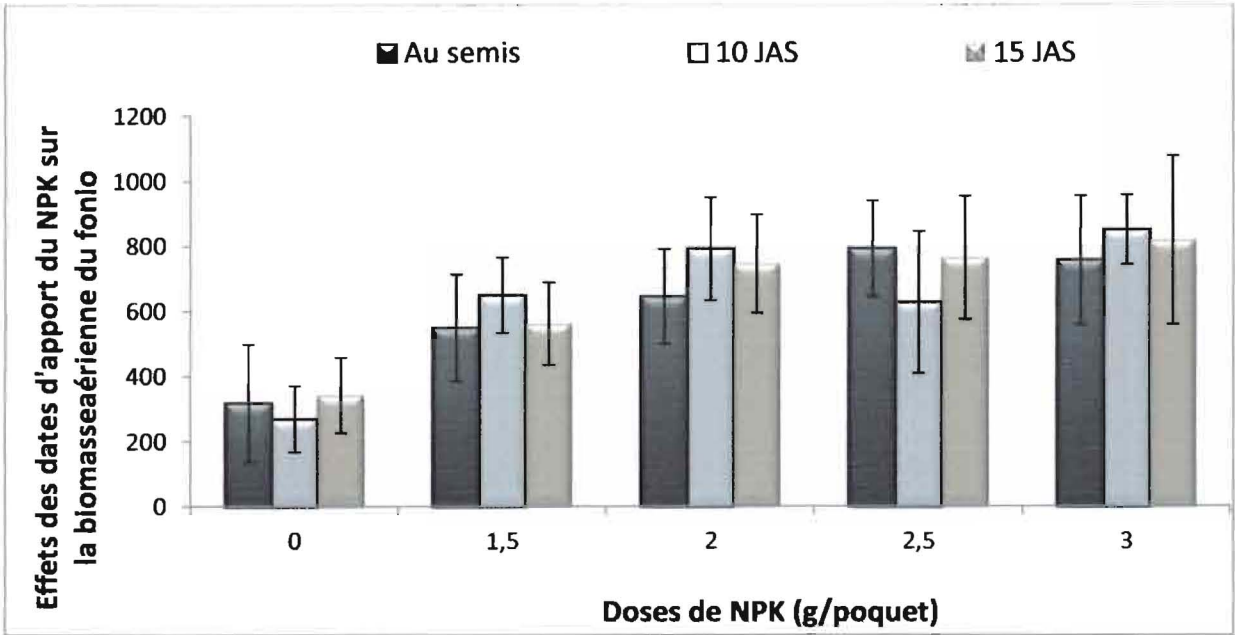


Figure 5 : Effets des dates d'apport du NPK sur la biomasse aérienne du fonio

On note néanmoins une exception pour la dose de 2,5 g.poquet⁻¹ qui entraine une faible production au 10^{ème} JAS par rapport aux deux autres dates d'apport. Mais cette baisse de la production n'est pas statistiquement significative. On enregistre par ailleurs et d'une manière générale une augmentation proportionnelle de la biomasse à celle de la dose de NPK apportée. Cela ne semble pas vérifier au 10^{ème} jour d'apport où la biomasse produite par la dose de 2,5 g.poquet⁻¹ est égale à celle produite par 1,5 g.poquet⁻¹ et donc plus faible que celle obtenue avec 2 g.poquet⁻¹. Signalons ici de grands écarts entre les traitements constatés.

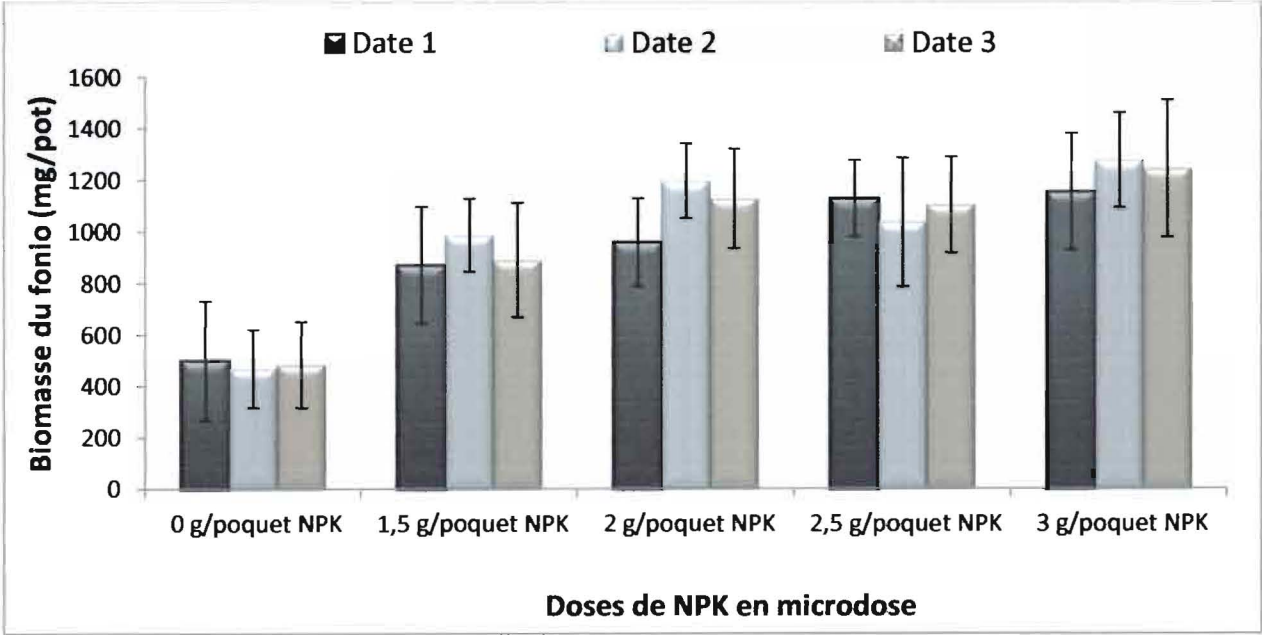


Figure 6: Effets des dates d'apport du NPK en microdose sur la biomasse totale du fonio

3.1.1.2. Effets des traitements sur la production du sorgho

3.1.1.2.1. Effets sur la croissance du sorgho

Les effets des apports combinés de la matière organique et des engrais minéraux sur la croissance du sorgho sont présentés sur les figures 7 et 8. La hauteur des plants a été mesurée aux 50^{ème} et 60^{ème} JAS.

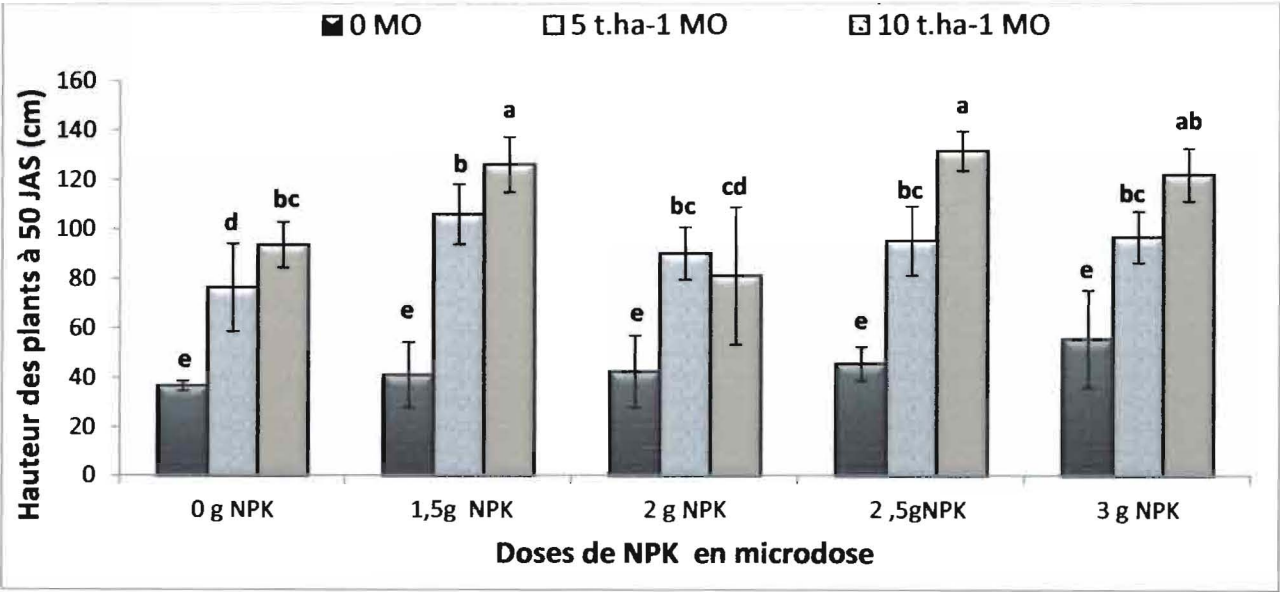


Figure 7 : Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur la croissance du sorgho à 50 JAS

Les traitements accompagnés d'une même lettre ne sont pas significativement différents à la probabilité de 5 %.

❖ Au 50^{ème} JAS

Les hauteurs moyennes des plants représentées sur la figure 7 sont de 36,5 cm, 40,8 cm, 42,2 cm, 45,4 cm et 55,3 cm pour les doses de NPK seul. Les fumures mixtes de NPK + 5 t.ha⁻¹ de matière organique ont donné des valeurs plus élevées que les fumures minérales exclusives (76,3 cm, 105,8 cm, 89,9 cm, 94,9 cm et 96,4 cm). Les combinaisons de NPK avec 10 t.ha⁻¹ de matière organique ont enregistré des hauteurs moyennes plus importantes que les précédentes (93,5 cm, 125,8 cm, 80,9 cm, 131,2 cm et 121,5 cm). Comparées au témoin absolu, toutes les doses de NPK seul et combinées avec la MO ont eu des effets positifs sur la croissance des plants (figure 7). Toutefois, les traitements avec le NPK seul ont donné des croissances similaires à celle du témoin à la probabilité de 5%.

En revanche, les apports combinés de la MO et du NPK améliorent de façon significative la croissance du sorgho comparativement aux fumures minérales exclusives. On distingue cinq groupes homogènes de combinaisons (figure 7). Les combinaisons les plus performantes sur le plan agronomique sont: 10 t.ha⁻¹ de MO + 2,5 g.poquet⁻¹ de NPK (131,2 cm), 10 t.ha⁻¹ de MO + 1,5 g.poquet⁻¹ de NPK (125,8 cm), 10 t.ha⁻¹ de MO + 3 g.poquet⁻¹ de NPK (121,5 cm), 5 t.ha⁻¹ de MO + 1,5 g.poquet⁻¹ de NPK (105,8 cm) et 5 t.ha⁻¹ de MO + 3 g.poquet⁻¹ de NPK (96,4 cm). Les plus faibles valeurs de croissance sont obtenues avec les doses de NPK seul.

La combinaison de 10 t.ha⁻¹ de matière organique avec 2 g.poquet⁻¹ de NPK a eu un effet plutôt dépressif sur la croissance. D'une manière générale, on observe une grande variabilité dans la croissance des plants issus du même traitement à ce stade avec un coefficient de variation de 15,5%.

❖ Au 60^{ème} JAS

A 60 JAS, l'analyse de variance n'a pas révélé de différences significatives entre les traitements (figure 8). Néanmoins, on a enregistré une amélioration de la croissance avec toutes les combinaisons comparées au NPK seul. Par ailleurs, on note une accentuation des écarts de croissance au niveau des traitements avec le NPK seul alors qu'au niveau des combinaisons, ceux-ci baissent considérablement par rapport aux écarts observés au 50^{ème} JAS.

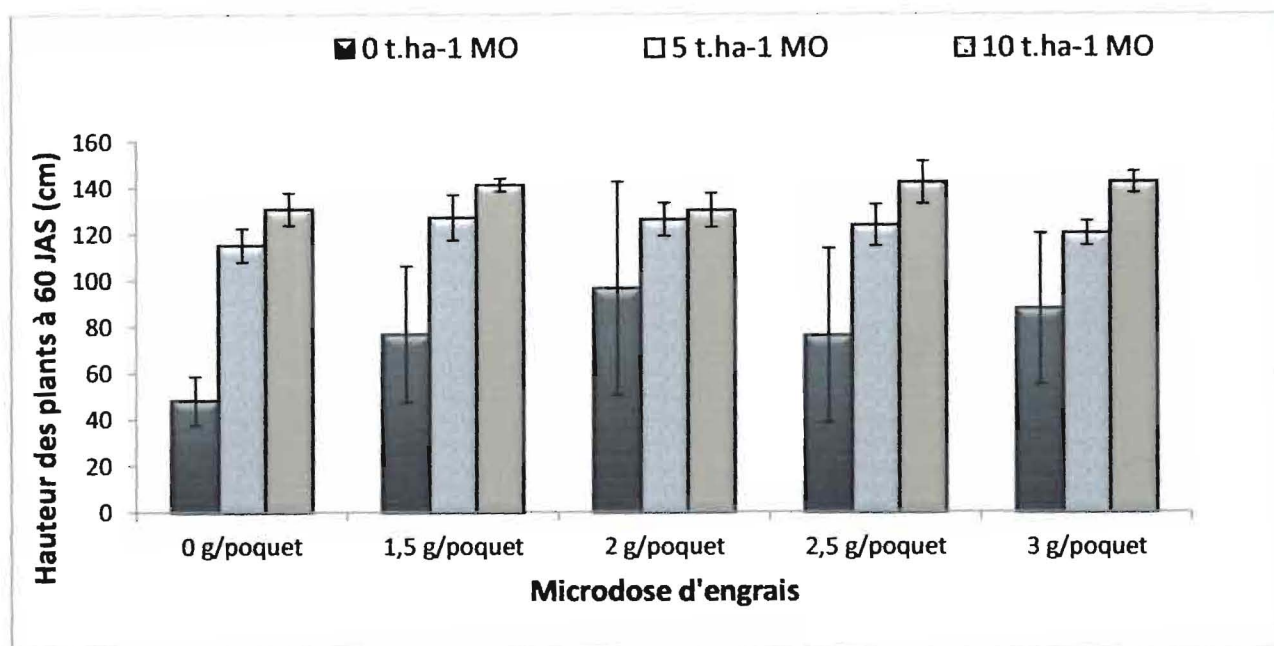


Figure 8: Effets de la combinaison matière organique – engrais minéraux sur la croissance du sorgho au 60^{ème} JAS

3.1.1.2.2. Effets sur les rendements grains et paille du sorgho

D'une manière générale, les rendements obtenus sont faibles par rapport à la moyenne en milieu paysan (1,7 t.ha⁻¹). Les rendements vont de 13,3 à 32,9 g.pot⁻¹ soit 415,6 à 1027 kg.ha⁻¹ pour le rendement en paille et de 4,9 à 30,1 g.pot⁻¹ soit 152,2 à 941,3 kg.ha⁻¹ pour le rendement en grains (Annexe 4). Les plus grandes valeurs au niveau de la paille (Figure 9) sont enregistrées avec les combinaisons de 5 t.ha⁻¹ de MO + 3 g.poquet⁻¹ de NPK (32,9 g.pot⁻¹), 10 t.ha⁻¹ de MO + 3 g.poquet⁻¹ de NPK (32,7 g.pot⁻¹), 5 t.ha⁻¹ + 2,5 g.poquet⁻¹ (32,5 g.pot⁻¹), 10 t.ha⁻¹ de MO + 2 g.poquet⁻¹ de NPK (32 g.pot⁻¹) et 10 t.ha⁻¹ de MO + 2,5 g.poquet⁻¹ de NPK (31,4 g.pot⁻¹).

Sur le rendement grains (figure 10), les combinaisons de 10 t.ha⁻¹ avec 3 g, 2,5 g, 1,5 g, 2 g et de 5 t.ha⁻¹ avec 3g et 2 g sont les plus performantes (30,1 g.pot⁻¹, 29,4 g.pot⁻¹, 23,1 g.pot⁻¹, 22 g.pot⁻¹, 21,8 g.pot⁻¹ et 21,2 g.pot⁻¹ respectivement). Les combinaisons de 5 t.ha⁻¹ et 10 t.ha⁻¹ avec le NPK ont respectivement amélioré le rendement paille de 27% et de 127% et celui des grains de 50% et de 87% comparativement à la fumure minérale seule. Comparativement à la fumure organique seule, on enregistre des taux d'accroissement de 55% et 17% sur le rendement paille et 48% et 42% sur le rendement grains avec respectivement 5 t.ha⁻¹ et 10 t.ha⁻¹ de fumier. Les traitements ne sont cependant pas statistiquement différents.

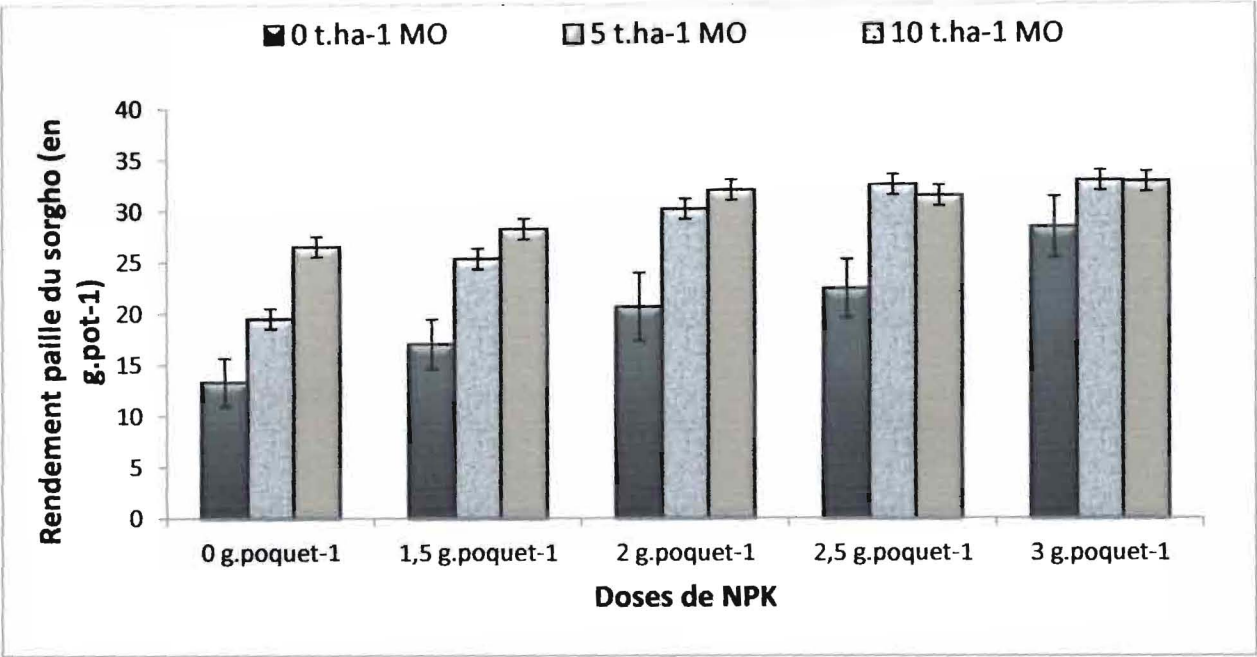


Figure 9: Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur le rendement paille du sorgho

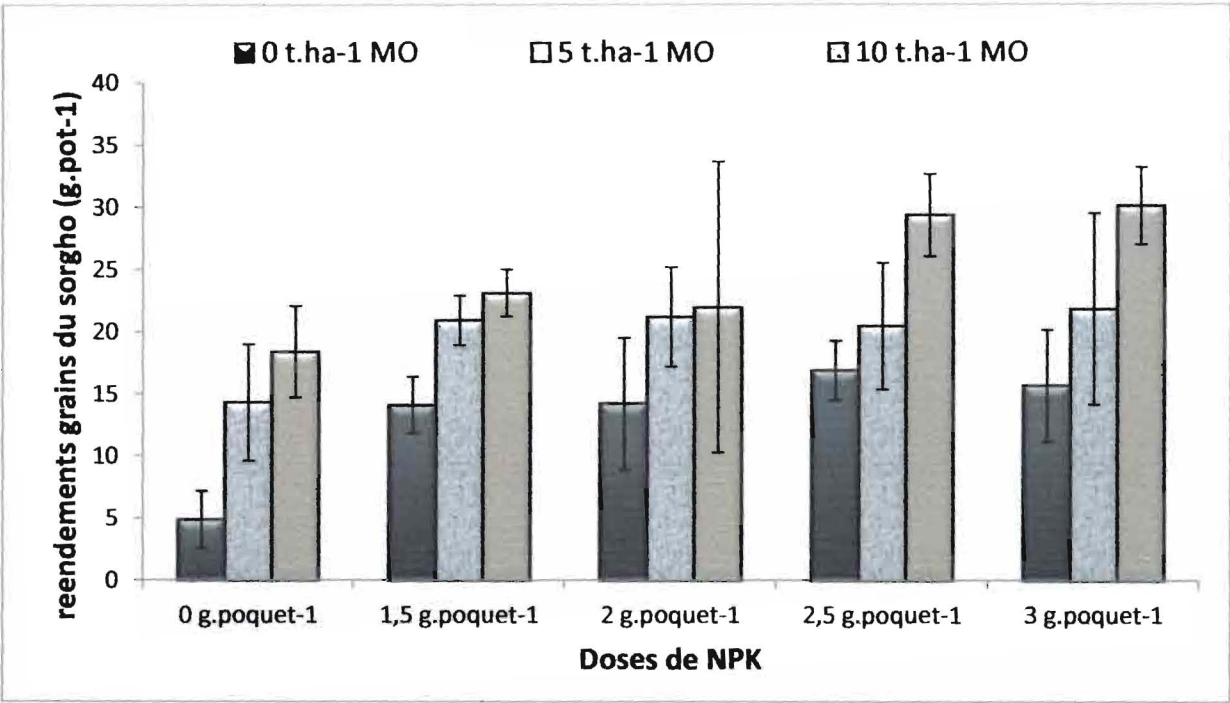


Figure 10: Effets de la combinaison matière organique – engrais minéraux sur le rendement grains du sorgho

3.1.1.2.3. Effets sur les paramètres de rendement du sorgho

Les résultats de l'analyse de variance (tableau 4) montrent que les paramètres de rendement à l'exception du nombre de thalles n'ont pas été significativement affectés par les combinaisons de fumier et de NPK. Néanmoins, toutes les combinaisons ont eu un effet positif sur l'ensemble de ces paramètres par rapport au témoin absolu et aux témoins avec la fumure minérale seule et la MO seule.

Tableau 3: Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur les paramètres de rendement du sorgho

Traitement	Poids racines	Poids thalles	Poids panicules	Biomasse aérienne totale	Poids mille grains	Nbre de thalles	Nbre de panicules	Grains/panicules
	g.pot ⁻¹							
0 MO x 0 NPK	2,0	0	6,8±2,9	20,1±5,2	16,1±2,3	0 d	2±0	0,7±0,08
0 MO x 1,5 NPK	8,9	0,8	17,8±2,6	35,5±3,7	19,5±2,8	1 cd	2±1	0,79±0,02
0 MO x 2 NPK	7,9	1,6	17,9±6,7	40,1 ± 8,7	17,8±1,5	4 b	2±1	0,80±0,01
0 MO x 2,5 NPK	7,8	1,1	21,2±2,8	44,6±3,7	19±1	3 c	2±0	0,80±0,01
0 MO x 3 NPK	10,8	4,2	20,1±5,3	52,7±7,3	16,5±2	3 c	2±0	0,78±0,02
5 MO x 0 NPK	9,5	1,4	17,2±5,9	38,0±6,6	21±2,3	4 b	2±0	0,83±0,01
5 MO x 1,5 NPK	14,6	0,8	24,9±2,3	51±4,5	21,0±1,8	5 b	2±0	0,84±0,01
5 MO x 2 NPK	18	1,0	25,8±3,6	57±1,7	21,2±1,5	4 b	3±1	0,82±0,05
5 MO x 2,5 NPK	24,7	2,4	25,7±5,4	60,5±3,9	20,9±0,7	4 b	3±1	0,79±0,04
5 MO x 3NPK	25,3	3,2	27,3±7,9	63,4±4	20,9±2,1	5 b	4±1	0,79±0,05
10 MO x 0 NPK	16,0	3,5	22±3,9	51,9±6,8	21,1±1,5	7 a	2±0	0,83±0,03
10 MO x 1,5 NPK	18,4	4,2	27,6±2	60,0±1,6	22,1±1,4	8 a	2±1	0,84±0,02
10 MO x 2 NPK	14,6	5,5	26,5±12,5	64,0±5,4	21,7±2,2	6 a	2±1	0,78±0,14
10 MO x 2,5 NPK	16,3	5	35,6±4	72,0±6	20,3±2,4	6 a	3±1	0,83±0,01
10 MO x 3 NPK	22,7	4,8	36,4±2,9	73,9±2	20,4±1,4	7 a	3±1	0,83±0,02
LSD	7,903	4,2	7,549	7,303	2,72	2,515	0,7141	0,07
Probabilité	0,113	0,951	0,69	0,654	0,565	0,026	0,059	0,079
Signification	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS

LSD = plus petite différence significative ; S = significatif ; NS = non significatif ; Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

Les poids des racines sont compris entre 2 et 25,3 g.pot⁻¹. Les racines deviennent plus denses avec les apports combinés qu'avec les apports dissociés de fumier et d'engrais minéraux.

On enregistre des poids de thalles allant de 0 à 5,5 g.pot⁻¹. On note une plus grande importance du poids des thalles suite aux apports combinés de fertilisants organiques et minéraux.

Les panicules pèsent entre 6,8 et 36,4 g.pot⁻¹ et leurs nombres varient de 2 à 4 panicules.pot⁻¹. Les traitements associant le fumier et le NPK ont permis d'obtenir des panicules plus grosses.

Quant à la biomasse aérienne totale, elle est faible et varie entre 20,1 et 73,9 g.pot⁻¹, les fumures minérales exclusives enregistrant les plus faibles valeurs.

Le poids des mille grains et le rapport grains/panicules sont respectivement de 16,1 à 22,1 g et de 0,70 à 0,84 et témoignent d'un bon remplissage des grains. Toutefois, les apports combinés ont permis un meilleur remplissage des grains avec des taux généralement supérieurs à 80%.

Sur le nombre de thalles, toutes les combinaisons ont induit une production plus importante que le témoin absolu qui a une production quasi nulle. Cette production est plus abondante avec les apports organiques qu'avec le NPK seul. On note en outre, une production significativement plus importante de thalles avec 10 t.ha⁻¹ de fumier qu'avec 5 t.ha⁻¹.

3.1.1.2.4. Rentabilité économique des traitements sur la production du sorgho

L'impact économique des différents traitements est consigné dans le tableau 5.

Tableau 4: Effets de la combinaison matière organique - engrais minéraux sur la rentabilité économique du sorgho

Traitements	Poids paille (kg/ha)	Valeur Production paille (FCFA/ha)	Poids grains (kg/ha)	Valeur production grains (FCFA/ha)	Valeur Production totale (Kg/ha)	coût des fertilisants/ha	RVC
T0	416	29120	152	26117	55237	0	-
T1	530	37100	439	75429	112529	33398	3,4
T2	644	45080	443	76116	121196	44531	2,7
T3	699	48930	527	90549	139479	55664	2,5
T4	886	62020	489	84020	146040	66797	2,2
T5	608	42560	446	76632	119192	50000	2,4
T6	790	55300	653	112198	167498	83398	2,0
T7	941	65870	662	113745	179615	94531	1,9
T8	1015	71050	639	109793	180843	105664	1,7
T9	1027	71890	682	117181	189071	116797	1,6
T10	828	57960	574	98625	156585	100000	1,6
T11	881	61670	722	124054	185724	133398	1,4
T12	999	69930	686	117869	187799	144531	1,3
T13	981	68670	917	157559	226229	155664	1,5
T14	1023	71610	941	161683	233293	166797	1,4

Ce tableau indique que les rapports vont de 1,3 à 3,4. Les rapports les plus élevés sont enregistrés avec les traitements utilisant uniquement de l'engrais minéral et les plus faibles sont obtenus avec les combinaisons associant 10 t.ha⁻¹ et l'engrais minéral.

3.1.2. Discussion

Les résultats de l'analyse statistique ont révélé que les plants à la fois amendés au fumier et fertilisés aux engrais minéraux ont eu un développement végétatif supérieur à ceux fertilisés avec les engrais minéraux uniquement à 50 JAS. Cette performance des fumures organo-minérales pourrait s'expliquer par le fait que le fumier a contribué à améliorer les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol comme l'ont montré nos résultats sur les analyses chimiques du sol (3.2). En effet, les résultats des analyses chimiques montrent que les teneurs en MO et en P assimilable ont été sensiblement améliorées sur les sols ayant reçu à la fois un amendement organique et une fumure minérale que sur les sols ayant reçu uniquement de l'engrais minéral ou du fumier. Il en est de même pour l'acidité du sol qui a connu une baisse grâce aux apports organiques. Aussi, des corrélations simples entre les paramètres chimiques et la biomasse du fonio montrent que la matière organique explique une part importante de la production. En outre, cette performance pourrait également être imputable au mode d'apport de l'engrais minéral (au poquet). Ce mode a probablement permis d'augmenter les teneurs en éléments nutritifs immédiatement disponibles à proximité des plantes et qui interviennent dans leur croissance, tels que le phosphore assimilable. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Soma (2010) qui a noté une amélioration de la croissance du sorgho suite à des apports combinés de compost et de fumier avec des engrais minéraux comparés à la fumure minérale seule. Par contre à 60 JAS, les combinaisons n'induisent pas de croissance significative en comparaison avec les apports dissociés de MO et de NPK. Ce ralentissement se justifierait par le fait que les plants ont atteint une croissance végétative maximale que l'on pourrait lier au mode d'apport des engrais minéraux qui aurait agi sur leur vitesse de croissance. Le rôle stimulateur de la croissance des racines des plants par la microdose a été noté par Aune et Bationo (2008). En outre, cette période correspondrait à la phase de reproduction de la culture car plus de la moitié des plants étaient en gonflement (annexe 1).

Les rendements en grains et paille du sorgho dans cette étude sont très bas comparés au rendement en milieu paysan. Ces faibles rendements se justifieraient par les conditions climatiques et les conditions de culture. En effet, cet essai a été réalisé en contre-saison sur une période froide assez longue (décembre-janvier-février) et en vase de végétation. Ces conditions n'ont certainement pas

permis à la culture de profiter au maximum des nutriments mis à sa disposition pour exprimer au mieux toutes ses potentialités productives. Quoique la croissance en hauteur des plants ait été rapide, les tiges sont restées quelque peu étiolées. L'espace confiné de même que les basses températures ont probablement agi de façon négative sur l'épanouissement des racines et partant la nutrition minérale, dont les conséquences sont une croissance limitée en épaisseur et une faible expression du potentiel productif de la culture. Toutes ces raisons pourraient justifier la réduction de la production. Il en est de même pour la production de la biomasse du fonio qui a été également en-dessous de la moyenne. En effet, Kanfany (2009) a montré que le fonio supporte des températures élevées dont les plus favorables sont comprises entre 27°C et 30°C. Les basses températures justifieraient en partie donc la faible production de la biomasse. Toutefois, en dépit de la faible production des cultures, les traitements organo-minéraux ont induit des améliorations sensibles par rapport à la fumure minérale exclusive et aux amendements organiques seuls. Cela serait dû à l'amélioration de la nutrition minérale des plantes suite à celle des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol et au mode d'apport de l'engrais minéral. Plusieurs auteurs ont investigué sur l'effet améliorateur des fumures organo-minérales aussi bien sur les caractéristiques du sol que sur la production. Gnankambary (2007) et Traoré (2012) ont noté des hausses significatives de rendements à la suite d'apports combinés de matière organique et d'engrais minéraux en milieu paysan. Sedogo (1981) a également montré que l'adjonction de la fumure minérale à la fumure organique augmentait la production végétale. En outre, Palé et *al* (2009) ont noté des accroissements des rendements du sorgho de plus de 30% comparativement à la dose vulgarisée et de plus de 140% comparativement à la pratique paysanne suite à la fertilisation par microdose. Par ailleurs, à l'exception de la croissance et des rendements grains du sorgho, les performances des cultures augmentent avec l'augmentation de la dose de l'engrais minéral et de celle du fumier. Ainsi, on relève que toutes les doses au-delà de 1,5 g.poquet⁻¹ combinées à 5 et à 10 t.ha⁻¹ de fumier induisent les meilleurs rendements en paille du sorgho et la biomasse du fonio sur le plan agronomique. Aussi, la recommandation de 2 g.poquet⁻¹ de NPK et de 5 t.ha⁻¹ de matière organique se confirme. La faible croissance et le faible rendement grains du sorgho enregistrés par la dose de 2 g/poquet comparativement aux plus petites doses se justifieraient par la grande variabilité observée au sein des traitements.

L'apport de l'engrais minéral à différentes dates n'a pas eu d'effets significatifs sur la production de biomasse. C'est donc dire que l'application de l'engrais minéral en microdose pourrait s'étendre indifféremment sur les 15^{es} jours après semis sans compromettre la production des cultures. En effet, jusqu'à cette période, les besoins en éléments nutritifs des plantes demeurent

importants. Par conséquent, un apport d'engrais en ce moment est bien indiqué pour améliorer leur croissance végétative. Cependant, compte tenu des pertes importantes en nutriments que l'on peut enregistrer en début de saison et avant la levée des plants suite aux phénomènes de lixiviation, il serait préférable d'effectuer ces apports entre le 10^{ème} et le 15^{ème} JAS. Cela permettrait de limiter un temps soit peu les effets de ces phénomènes et d'accroître l'absorption par les jeunes plants des nutriments apportés. Nos résultats concordent avec ceux de Aune (2007) et de Hayashi et *al* (2008). En effet, Aune (2007) a indiqué qu'un apport d'engrais minéral jusqu'à 21 JAS n'influe pas sur les rendements des cultures. Quant à Hayashi et *al* (2008), ils ont noté sur une expérimentation de 3 ans que la biomasse du mil n'a pas été significativement affectée par la période d'apport de l'engrais, même à 60 JAS à la 3^{ème} année. Ils ont attribué les faibles biomasses enregistrées 7 et 45 JAS (en 1^{ère} année) et 21 JAS (en 2^{ème} année) aux conditions pluviométriques.

Toutefois, sur le plan de la rentabilité économique, seule la formule organo-minérale de 1,5 g de NPK avec 5 t.ha⁻¹ de fumier, s'est révélée rentable avec un RVC supérieur à 2. La formule de 2 g.poquet⁻¹ + 5 t.ha⁻¹ présente un RVC proche de 2 (1,9) et pourrait également présenter un intérêt économique. Les formules associant 10 t.ha⁻¹ aux doses de NPK sont moins attrayantes du point de vue économique. Les faibles RVC des combinaisons seraient dus d'une part aux coûts élevés des fertilisants apportés à l'hectare et d'autre part au faible accroissement de la production par ces combinaisons. Nos résultats sont en concordance avec ceux de Aune et *al* (2007). Ces auteurs ont montré en effet, au Mali que 0,3 g.poquet⁻¹ de Di-ammonium ou de NPK (15-15-15) était économiquement plus rentable avec des RVC allant de 9,33 à 9,37 sur le sorgho et de 3,4 à 11,9 sur le mil que la dose de 6 g.poquet⁻¹ de ces engrais qui a enregistré des RVC de 0,67 à 1,17 et de 0,43 à 0,55 respectivement sur le sorgho et le mil. Cependant, compte tenu de la disponibilité partielle des nutriments dans les formules organo-minérales et de l'aspect sommaire de cette analyse, la rentabilité actuelle ne semble pas suffisante pour apprécier véritablement l'effet des apports en une campagne.

Conclusion partielle

En dépit des conditions climatiques défavorables (basses températures : 23,5°C en moyenne, 14°C environ pour les minima et 33°C pour les maxima) on a relevé une amélioration de la production des cultures par les différentes combinaisons. Il importe donc que pour une meilleure production agricole sur les sols ferrugineux tropicaux et pour une durabilité des systèmes de production, l'adjonction de la matière organique à la fumure minérale demeure importante. Aussi, l'apport des engrais minéraux en petite quantité et au poquet permet d'améliorer quantitativement la

production des cultures. L’engrais minéral apporté au semis, 10 JAS et 15 JAS n’a pas influencé la production de la culture. Jusqu’à 15 JAS l’engrais agit de façon efficace sur la production. Les résultats de la présente étude montrent que dans un intervalle de 1 à 15 JAS, la date de fertilisation minérale importe peu quand bien même la période entre 10 et 15 JAS est préférable pour minimiser les phénomènes de lixiviation. L’analyse économique quant à elle, est sommaire et ne peut conduire à des conclusions fermes et définitives.

3.2. Effets des apports combinés de matière organique et d’engrais minéraux sur les caractéristiques chimiques du sol

3.2.1. Résultats

Les résultats des analyses des échantillons de sol prélevés après la récolte sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Effets de la combinaison de la matière organique et des engrais minéraux en microdose sur les paramètres chimiques du sol

Traitement	pH eau	MO (%)	P assimilable (mg/kg de sol)
0t MO x 0g NPK	5,7 ± 0,18	0,6±0,4	5,1±0,1
0t MO x 1,5g NPK	5,7 ± 0,09	0,9±0,2	5,1±0
0t MO x 2g NPK	5,7 ± 0,06	0,8±0	5,2±0,1
0t MO x 2,5g NPK	5,6 ± 0,05	0,9±0,1	5,2±0,1
0t MO x 3g NPK	5,7 ± 0,08	0,9±0,2	5,6±0,6
5t MO x 0g NPK	6,7 ± 0,06	1,1±0,1	6,2±0,1
5t MO x 1,5g NPK	6,6 ± 0,08	1,1±0	6,5±0,5
5t MO x 2g NPK	6,6 ± 0,07	1,1±0,1	6,3±0,1
5t MO x 2,5g NPK	6,6 ± 0,05	1,1±0	7,0±0,6
5t MO x 3g NPK	6,6 ± 0,12	1,1±0	7,1±0,5
10t MO x 0g NPK	7,3 ± 0,1	1,2±0,1	6,8±0,6
10t MO x 1,5g NPK	7,1 ± 0,08	1,3±0,1	8,1±1
10t MO x 2g NPK	7,1 ± 0,12	1,3±0,1	8,1±0,6
10t MO x 2,5g NPK	7,1 ± 0,05	1,3±0,1	8,2±0,5
10t MO x 3g NPK	7,0 ± 0,03	1,3±0	8,5±0,9
LSD (5 %)	0,1212	0,1882	0,7513
Fr probabilité	0,178	0,365	0,112
Signification	NS	NS	NS

NS = non significatif, LSD = Plus petite différence significative

3.2.1.1. Effets des traitements sur le pH du sol

L'analyse statistique des données du pH du sol (tableau 5) montre que toutes les doses combinées de MO avec le NPK ont sensiblement amélioré ce paramètre. Les variations de pH sont importantes des fumures minérales exclusives aux combinaisons avec 5 t.ha⁻¹ puis avec 10 t.ha⁻¹. En effet, les pH varient entre 5,6 et 5,7 (moyennement acide) pour les fumures minérales exclusives, alors que pour les fumures organo-minérales ils sont faiblement acides (6,6 à 6,7) pour 5 t.ha⁻¹ de MO combinés aux différentes doses de NPK et neutres (7 à 7,3) pour les combinaisons du NPK avec 10 t.ha⁻¹ de MO. D'une manière générale, l'acidité du sol est restée stable avec les apports de NPK seul et a baissé avec les apports de matière organique. Toutefois, l'analyse de variance n'a pas révélé de différences significatives entre les différentes formules de fertilisation.

3.2.1.2. Effets des traitements sur la matière organique du sol

Les teneurs en matière organique sont variables en fonction des traitements (tableau 5). Elles évoluent de 0,6 à 1,3%. Les plus fortes valeurs sont enregistrées avec les apports combinés de 10 t.ha⁻¹ et de l'engrais NPK et les plus faibles valeurs proviennent des apports minéraux seuls. On a enregistré une amélioration de la teneur en MO par rapport au témoin sans apport et au témoin avec de l'engrais minéral seul sans pour autant noter de différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

3.2.1.3. Effets des traitements sur le phosphore assimilable

Selon les résultats des analyses des échantillons de sol prélevés après les récoltes (tableau 5), les teneurs en phosphore assimilable du sol ont augmenté suite aux apports combinés de fumier et de NPK. Les valeurs de P assimilable sont importantes avec les apports de 10 t.ha⁻¹ de fumier (6,8 à 8,5 mg.kg⁻¹ de sol) et moins avec 5 t.ha⁻¹ de fumier (6,2 à 7,1 mg.kg⁻¹ de sol) et 0 t.ha⁻¹ de fumier (5,1 à 5,6 mg.kg⁻¹ de sol). Ces différences arithmétiques ne sont cependant pas statistiquement significatives.

3.2.1.4. Relation entre le pH, les teneurs en MO, en P assimilable du sol et la biomasse du fonio

Le tableau 6 présente les corrélations entre les propriétés chimiques du sol et la biomasse aérienne du fonio. Ces corrélations simples ont été effectuées en vue de déterminer la proportion de chaque paramètre chimique dans la production de la biomasse aérienne du fonio. Il ressort de cette analyse que la biomasse du fonio est positivement corrélée avec la teneur en MO du sol

(probabilité = 0,046). Elle explique en effet, 52% de la production de biomasse. La teneur en phosphore assimilable et le pH du sol sont par contre moins corrélés avec la biomasse. La teneur en phosphore assimilable explique cette production à près de 50% (probabilité = 0,060) et le pH, seulement à 23% (probabilité = 0,407).

Tableau 6: Corrélations entre les propriétés chimiques du sol et la biomasse aérienne du fonio

Paramètres	Corrélations	Probabilité
pH	23,1	0,407
Matière organique	52,1	0,046
P assimilable	49,5	0,06

3.2.2. Discussion

Les faibles teneurs en MO et en phosphore assimilable du sol ainsi que le niveau d’acidité des sols relevés, représentent des caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux (pauvres en MO et en éléments majeurs tels que l’azote et le phosphore). Les travaux de Pallo et *al* (1989) montrent que ces sols dans 70% des cas ont des teneurs en MO inférieures à 2% et ceux de Lompo (2009) indiquent qu’ils sont carencés en phosphore. Sedogo (1981 et 1993) et Zougmore et *al* (2004) ont montré que ces sols sont particulièrement pauvres en N et en P.

Le pH du sol a faiblement baissé avec l’apport des engrais minéraux seuls notamment avec la dose de 2,5 g.poquet⁻¹. On pourrait expliquer cette baisse par l’augmentation des ions acidifiants dans la solution du sol suite à la fumure minérale seule. Sedogo (1993) a fait la même observation sur le pH avec des apports de fumures minérales exclusives. Il relève en outre que l’acidification s’accompagne d’une augmentation du taux d’aluminium échangeable. L’apport de MO à 5 et 10 t.ha⁻¹ a considérablement réduit l’acidité du sol. Cette réduction de l’acidité serait liée d’une part à l’effet du fumier qui, de par sa teneur en bases permet un meilleur maintien du pH et partant limite l’acidité des sols comme l’ont noté Piéri (1989), Bado et *al* (1997), Zougmore et *al* (2003 et 2004) et d’autre part par le mode d’apport de l’engrais minéral. Ces bases fixent certains ions acidifiants tels que l’aluminium échangeable (Lompo, 2009) rendant ainsi le milieu moins acide. Aussi, l’application en microdose des engrais minéraux favorise un prélèvement immédiat des nutriments apportés par les plantes ; Ce qui empêcherait une grande dispersion des ions acidifiants dans la solution du sol. Par conséquent cette technologie permettrait également de contrôler l’acidité du sol. En ce sens, l’association de la matière organique et des engrais minéraux en microdose

pourrait constituer une composante du système de gestion intégrée de la fertilité des sols en vue de ralentir le phénomène de l'acidification des sols ferrugineux tropicaux tout en améliorant la nutrition minérale des cultures.

Les teneurs en matière organique et en phosphore assimilable sont plus élevés sur les sols amendés que sur les sols sans apport organique. Le fumier représente une source importante de nutriments tels que le carbone organique et le P assimilable. Cela a été mis en évidence par nos résultats. En effet, le statut organique du sol de même que la teneur en P assimilable ont été sensiblement améliorés dans les pots ayant reçu du fumier par rapport aux pots ayant reçu uniquement de l'engrais minéral et les pots sans aucun apport. Selon Zougmore et *al* (2004), l'apport de fumier représente la pratique la plus efficace qui, selon les doses et les types de sol permet d'entretenir et même d'améliorer le stock de matière organique du sol. En outre, sa minéralisation après décomposition permet la libération d'un certain nombre d'éléments nutritifs tels que le P assimilable. Lompo (2009) a également indiqué que les amendements organiques ainsi que leurs combinaisons avec des engrais minéraux ont augmenté le taux de phosphore disponible par rapport à la fertilisation minérale seule.

Conclusion partielle

Les propriétés physico-chimiques en l'occurrence le pH, les teneurs en MO et en P assimilable du sol ont été positivement modifiées par les amendements organiques et les apports minéraux en combinaison. L'amélioration des caractéristiques chimiques du sol passent par l'amélioration de son état physique et nutritionnel à travers les apports conjoints de matière organique et d'engrais minéraux. L'adoption de la microdose des engrais minéraux à la matière organique comme technique de gestion intégrée de la fertilité des sols pourrait permettre de ralentir l'acidification à laquelle sont confrontés les sols ferrugineux tropicaux et d'accroître leurs teneurs en éléments nutritifs.

Conclusion générale et perspectives

La faible utilisation des fertilisants organiques et minéraux en Afrique Sub-saharienne suite à leur indisponibilité et à leurs coûts élevés limite la production agricole de cette région du monde. La technologie de microdose des engrais a été prouvée comme une alternative à une plus grande utilisation de ces engrais par les petits producteurs et à l'augmentation durable de la production. La présente étude avait pour objectifs de déterminer : (1) les doses optimales de fumures organiques combinées à la fumure minérale en microdose sur les rendements du sorgho et la biomasse du fonio, (2) la date optimale d'apport du NPK en microdose et (3) d'évaluer leurs effets sur le pH, les teneurs en matière organique et en phosphore assimilable du sol. Les résultats montrent que :

- Malgré les conditions climatiques défavorables (basses températures), les différentes combinaisons de matière organique et d'engrais minéral ont amélioré la production des cultures. Cela indique que pour une meilleure production agricole sur les sols ferrugineux tropicaux et pour une durabilité des systèmes de production, l'adjonction de la matière organique à la fumure minérale demeure irremplaçable. Aussi, l'apport des engrais minéraux en faible quantité et au poquet permet d'améliorer quantitativement la production des cultures. En somme, toutes les doses combinées de matière organique et d'engrais minéraux ont été performantes sur le plan agronomique en induisant des hausses de production par rapport aux témoins sans apport de fertilisants, avec fertilisation minérale exclusive et avec amendement organique seul. Cependant, l'analyse économique indique plutôt une meilleure performance des doses croissantes de l'engrais minéral appliquées seules, de la formule de $5 \text{ t.ha}^{-1} + 1,5 \text{ g.poquet}$ et dans une moindre mesure $5 \text{ t.ha}^{-1} + 2 \text{ g.poquet}^{-1}$. En définitive, seules 5 t.ha^{-1} de fumier + $1,5 \text{ g.poquet}$ de NPK et 5 t.ha^{-1} de fumier + 2 g.poquet^{-1} peuvent être retenues comme microdoses organo-minérales optimales. Mais en raison du caractère sommaire de l'analyse économique, cette conclusion ne saurait être ferme et définitive.
- L'engrais minéral apporté au semis, 10 JAS et 15 JAS n'a pas influé sur la production de la biomasse du fonio. Dans cet intervalle, la date de fertilisation minérale importe donc peu quand bien même la période entre 10 et 15 JAS est préférable pour minimiser les phénomènes de lixiviation lors des premières pluies.
- Les apports organo-minéraux ont sensiblement amélioré les propriétés chimiques du sol. Le sol faiblement acide avec les fumures minérales seules est passé à un état quasi neutre

avec les apports combinés de matière organique et d'engrais minéraux. Les apports combinés ont permis une augmentation du pH d'environ une unité pour 5 t.ha⁻¹ et de deux unités pour 10 t.ha⁻¹ de fumier. Les teneurs moyennes en MO du sol ont augmenté de 124% par rapport au témoin absolu et de 57% comparativement à la fumure minérale exclusive lorsqu'on applique 10 t.ha⁻¹ de fumier. Les apports de 5 t.ha⁻¹ de fumier permettent en revanche d'améliorer ces teneurs de 92% et de 34% en comparaison au témoin absolu et à la fumure minérale seule respectivement. La fumure organique seule a eu un effet similaire à celui des combinaisons matière organique-NPK sur les taux de matière organique. Les apports organo-minéraux ont permis d'accroître les taux de phosphore assimilable de 33% et de 39% par rapport au témoin absolu avec 5 et 10 t.ha⁻¹ respectivement. Par rapport à la fumure minérale, Les teneurs en phosphore assimilable ont augmenté de 27% pour 5 t.ha⁻¹ et de 52% pour 10 t.ha⁻¹. Comparativement à la fumure organique seule, le taux de phosphore assimilable a connu des accroissements de 8,5% et 21% respectivement par les apports combinés avec 5 t.ha⁻¹ et 10 t.ha⁻¹ de fumier.

Les performances des cultures semblent avoir été limitées par les conditions climatiques et de culture. Ces conditions ont probablement été défavorables à l'expression de toutes les potentialités des spéculations utilisées et à une visibilité des résultats espérés sur les formules de fumure expérimentées, notamment les doses optimales combinées sur les rendements. En perspectives, il serait intéressant de reconduire l'essai en milieu réel en vue de :

- déterminer plus aisément les doses optimales combinées sur les rendements du sorgho et ce par une évaluation économique plus poussée qui prenne en compte tous les coûts liés à la fertilisation ;
- évaluer l'effet de ces traitements sur les caractéristiques physico-chimiques (tous les éléments majeurs), biologiques du sol et établir un bilan minéral suite à ces traitements afin de déterminer les effets à long terme de la microdose des engrais sur la fertilité chimique et biologique du sol ;
- Valider les résultats de cette étude en vase de végétation ;
- L'objectif de la microdose des engrais étant de minimiser les coûts de production liés aux fertilisants, des doses moins élevées de MO que 5 et 10 t.ha⁻¹ pourraient être envisagées pour les expériences futures.

Références bibliographiques

Abdou A., Koala S., Bationo A., 2012. Long term soil fertility trials in Niger, West Africa. 20p.

Abdoulaye T. and Sanders J., 2005. News technologies, marketing strategies and public policy for traditional food crops: Millet in Niger. *Agricultural systems* 90 (2006), pp 272-292.

Adoukonou-Sagbadja H., Dansi A. Vogouhè R., Akpagana K., 2006. Indigenous knowlegde and traditional conservation of fonio millets (*Digitaria exilis* Stapf, *Digitaria iburua* Stapf) in Togo. *Biodivers Conserv* 15: pp 2379-2395.

Adoukonou-Sagbadja H., Wagner C., Dansi A., Ahlemeyer J., Dainou O., Akpagana K., Ordon F., Friedt W., 2007. Genetic diversity and population differentiation of traditional fonio millet (*Digitaria* spp) landraces from different agro-ecological zones of West Africa. *Theor Appl Genet* 115: pp 917-931.

Adoukonou-Sagbadja H., 2010. Genetic characterization of traditional fonio millets (*Digitaria exilis*, *D. iburua* STAPF). Landraces from West Africa. Implications for conservation and breeding. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Agricultural Science at the Faculty of Agricultural Sciences, Nutritional Sciences and Environmental Management. Institute of Crop Science and Plants Breeding I. Justus-Liebig University. Giessen, Germany. 107p.

AFNOR., 1981. Détermination du pH. (Association Française de Normalisation) NF ISO 103 90. In *AFNOR qualité des sols*, Paris, pp 339-348.

Aliero A. A., and Morakinyo J. A., 2005. Photoperiodism in *Digitaria exilis* (Kipp) Stapf accessions. In: *African Journal of Agricultural Research* Vol 4, pp 241-244.

Aune B. J., 2007. Meilleures techniques et approches de développement pour l'amélioration de l'agriculture au Sahel. Première version d'une page web. 34p.

Aune B. J., Doumbia M. and Berthe A., 2007. Microfertilizing sorghum and pear millet in Mali. Agronomic, economic and social feasibility. *Agriculture*. Vol 36, N°3. 5p.

Aune B.J. and Bationo A., 2008. Agricultural intensification in the Sahel. The ladder approach. *Agricultural Systems* 98 (2008). Pp 119-125.

- Bado B. V., Sédogo P. M., Cescas M. P., Lompo F., Bationo A., 1997.** Effets à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cah. Agric.* 6, pp 571-575.
- Bado B. V., 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Laval Québec 184p.
- Bakasso Y., Barry B. M., Bezançon G., Cruz J.F., Noyer J. L., Pham J.L., 2010.** De la connaissance à la valorisation du fonio. Atelier International, Niamey, Niger, 9-11 décembre 2010. 1p.
- Bagayoko M., Maman N., Palé S., Sirifi S., Taonda S. J. B., Traore S., Mason S. C., 2011.** Microdose and N and P fertilizer application rates for pearl millet in West Africa. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 6(5), pp 1141-1150.
- Barro A., Zougmore R., Sedogo P.M., 2009.** Evaluation de la faisabilité de trois types de travail du sol : application du modèle Sarra dans le plateau central du Burkina Faso. *Sécheresse* 2009 ; (4) : pp 338-345.
- Bationo A., Lompo F., Koala S. (1998).** Research on nutrients flows and balances in West Africa: Agriculture, Ecosystems and Environment. 71, pp 19-35.
- Bonzi M., 1989** Etudes des techniques de compostage et évaluation de la qualité des composts:effets des matières organiques sur les cultures et la fertilité des sols. Mémoire de fin d'étude IDR. Université de Ouagadougou. 66p.
- Buerkert A., Bationo A., Piepho H-P., 2001.** Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in Sub-Saharan West Africa. *Field Crops Research* 72, pp 1-15.
- CAB., 2011.** Agronomie et travail du sol : la fertilité des sols en agriculture biologique. Fiches techniques. 4p.
- Chantereau C. et Nicou R., 1991.** Le sorgho. Le technicien d'Agriculture Tropicale, ACCT/CTA, Ed. Moissonneuse et Larose, Paris, Wageningen, 159p.
- Chivenge P., Vanlauwe B., Six Johan. (2010).** Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant Soil* (2011) 342 pp 1-30.

CIRAD., 2009. Fonio-Production. http://fonio.cirad.fr/la_plante/production. Consulté le 30/10/2013 à 12h58mn. 2p.

Coulibaly A., Aune J. B., Sissoko P., 2010. Etablissement des cultures vivrières dans les zones sahéliennes et soudano sahélienne du Mali. Groupe de Coordination des Zones Arides Rapport N°60. 65p.

Cruz J-F., Béavogui F., Dramé D., 2012. Valoriser une céréale traditionnelle africaine, le fonio. Grain de sel n°58 avril-juin-2012. 3p.

Cruz J-F., 2009. Le fonio, une céréale ancestrale remise au goût du jour. Travaux et innovations 163. Pp 28-31.

Dansi A., Adoukonou-Sagbadja H., Vodouhè R., 2010. Diversity, conservation and related wild species of fonio millet (*Digitaria* spp.) in the northwest of Benin. Genetic Resources and Crop Evolution 57: pp 827-839.

Delville P.L., 1996. Gérer la fertilité des terres des pays du sahel : diagnostic et conseil aux paysans. Collection le point sur. GRET. 397p.

Duparque A. et Rigolle P., 2006. Agro-Transfert Ressources et Territoire. Poster. 1p.

Elshout S. V.D., Sandwidi B., Ouédraogo E., Kaboré R., Tapsoba G., 2001. What are the prospects for intensifying soil fertility management in the Sahel. A case study from Sanmatenga, Burkina Faso. Managing Africa's Soils N°22. 30p.

FAO., 2003. Les engrais et leurs applications. Précis à l'usage des agents de vulgarisation agricole. Quatrième édition. 84p.

FAO., 2005. Evaluation du bilan des éléments nutritifs du sol. Approches et méthodologies. Bulletin FAO engrais et nutrition végétale n°14. 100p.

FAO., 2012. La fertilisation localisée au semis ou microdose. Fiche d'information/Niger. 4p.

Ferry L. Y., 2010. Impacts de l'interaction entre niveau d'infestation de *Striga hermonthica* (Del.) Benth., résistance variétale et microdose d'engrais sur le sorgho en zone soudanienne du Mali. Mémoire d'ingénieur. Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/IFRA) de Katibougou (Mali). 69p.

Gigou J., Stilmant D., Diallo T.A., Cissé N., Sanogo M.D., Vaksman M., 2009. Fonio millet (*Digitaria exilis*) response to N, P and K fertilizers under varying climatic conditions in West Africa. *Experimental Agriculture*, 45: pp 401-415.

Gnankambary Z., 2007. Compost and fertilizer mineralization on soil and harvest in parkland agroforestry systems in the south-sudanese zone of Burkina Faso. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural sciences. 48p.

Hayashi K., Abdoulaye T., Gerard B., Bationo A., 2007. Evaluation of application timing in fertilizer micro-dosing technology on millet production in Niger, West Africa. *Nutr Cycl Agroecosyst* 80, pp 257-265.

International Food Policy Research Institute., 2008. Impacts of Inventory Credit, Input Supply Shops and Fertilizer Microdosing in the Drylands of Niger. 88p.

Japan International Research Center for Agricultural Sciences., 2012. Une utilisation efficace de la technique de microdose d'engrais. Annexe: Manuel technique 5. « Guide pour la gestion et la conservation des ressources naturelles ». 32p.

Japan International Research Center for Agricultural Sciences., 2012. Introduction de la technique du placement mécanique de microdoses d'engrais et de la semence. Annexe: Manuel technique 8. « Guide pour la gestion et la conservation des ressources naturelles ». 18p.

Kanfany G., 2009. Effets de la fertilisation organo-minérale sur la croissance et le rendement du fonio (*Digitaria exilis* Stapf en Casamance et au Sénégal Oriental. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'études approfondies (DEA) en Agronomie et Protection des cultures. Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture de Thiès (Sénégal). 45p.

Kanté S., 2001. Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud. Thesis, Wageningen University. 243p.

Kiba D. I., 2012. Diversité des modes de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la qualité des sols et la production des cultures en zones urbaine, péri-urbaine et rurale au Burkina Faso. Thèse de doctorat unique de l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. 172p.

Lal R., 2008: Soil and sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28, pp 57-64.

- Lompo F., 2009.** Effets induits des modes de gestion de la fertilité sur les états du phosphore et la solubilisation des phosphates naturels dans deux sols acides du Burkina Faso. Thèse de doctorat. Université de Cocody. 200p.
- MAFAP., 2013.** Revue des politiques agricoles et alimentaires au Burkina Faso. Série rapport pays SPAAA, FAO, Rome, Italie. 234p.
- Marouzé C., Thaunay P., Fliedel G., Cruz JF., 2008.** Designing a fonio mill. Screening an operating principle and its validation. Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America 39: pp 9-15.
- Massé D., 2007.** Changements d'usage des terres dans les agro-systèmes d'Afrique Sub-saharienne. Propriétés des sols et dynamique des matières organiques. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Institut National Polytechnique de Toulouse. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse. 82p.
- Morris M., Kelly V. A., Kopicki R. J., Byerlee D., 2007.** Fertilizer Use in African Agriculture. Lessons learned and good practice guidelines. 162p.
- NEPAD., 2011.** La déclaration d'Abuja pour une révolution verte en Afrique : état d'avancement au niveau régional et national. 4p.
- Palé S., Mason S. C. and Taonda S. J. B., 2009.** Water and fertilizer influence on yield of grain sorghum varieties produced in Burkina Faso. S. Afr. J. Plant Soil 26(2), pp 91- 97.
- Palé S., 2011.** La fertilisation par microdose. Atelier d'échange et de formation des formateurs. CRDI/ACDI. Du 18 au 23 juillet 2011 à Niamey. 42p.
- Palé S., 2012.** Quantitative and qualitative studies on grain sorghum for traditional beer (dolo) production in Burkina Faso. Thesis of Ph.D in Agronomy of University of KwaZulu-Natal. Republic of South Africa. 150p.
- Pallo F. J. P. et Thiombiano L. (1989).** Sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétion du Burkina Faso: Caractéristiques et contraintes pour l'utilisation agricole. Bunasol. Soltrop 89. P 307-327
- Piéri C., 1989.** Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Agridoc-International, Paris. 444p.

Pouya M., 2008. Contribution à l'évaluation des performances agro-pédologiques des formules organo-phosphatées dans la zone Est du Burkina Faso : cas de trois villages de la province de la Tapoa (Kotchari, Pentinga et Fantou). Mémoire d'ingénieur. IDR/Agronomie. 90p.

Sanou M., 2014. Effets de l'application de deux sources de phosphore et du fumier sur les performances du sorgho et la biodisponibilité du phosphore dans les sols ferrugineux tropicaux en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. Mémoire de master II en géoressources. Université de Ouagadougou. 66p.

Sedogo P.M., 1981. Contribution à la valorisation des résidus culturels en sols ferrugineux et sous climat tropical semi-aride : matière organique du sol et nutrition azotée des cultures. Thèse Doct. Ingénieur. INPL, Nancy. 195p.

Sedogo P.M., 1993. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse Doct. Es sciences. 353p.

Segda Z., 2006. Gestion de la fertilité du sol pour une production améliorée et durable du riz (*Oryza sativa* L.) au Burkina Faso. Cas de la plaine irriguée de Bagré. Thèse de doctorat de l'université de Ouagadougou. Option: Biologie et Ecologie Végétales. 146p.

Soltner D., 2003. Les bases de la production végétale. Tome1. Le sol et son alimentation. Collection Sciences et techniques agricoles. 23^{ème} édition, 472p.

Soma D. M., 2010. Effets répétés des apports de diverses sources d'amendements organiques dans un sol ferrugineux tropical lessivé (Saria, Burkina Faso) sur la biodisponibilité du phosphore et la production du sorgho. Mémoire de DEA en gestion intégrée des ressources naturelles. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. 60p.

Somda B. B., 2010. Effets du biopost sur quelques propriétés chimiques et biologiques du sol et sur les rendements en culture maraîchère. Mémoire d'ingénieur du développement rural/option : agronomie. 74p.

Tabo R., Bationo A., Diallo Maimouna K., Hassane O and Koala S., 2006. Fertilizer microdosing for the prosperity of small-scale farmers in the Sahel: Final Report. Global theme on Agroecosystems Report n°23. PO Box 12404, Niamey, Niger. International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics. 28 PP.

Tabo R., Bationo A., Gerard B., Ndjeunga J., Marchal D., Amadou B. Garba M.A., Sogodogo D., Taonda J.B.S., Hassane O., Diallo M.K., and S. Koala., 2007. Improving cereal productivity and farmers' income using a strategic application of fertilizers in West Africa. In: Bationo, A., Waswa, B., Kihara, J., and J. Kimetu (eds). Advance in Integrated Soil Fertility Management in sub - Saharan Africa: Challenges and opportunities. Proceeding of Afnet International Symposium 17 – 21 September 2004, Yaounde Cameroun. Springer 2007. pp 589 – 598.

Tabo R., Bationo A., Hassane O., Amadou B., Fosu M., Sawadogo S., Kabore, Fatondji D., Ouattara K., Abdou A., and Koala S., 2009. Fertilizer microdosing for the prosperity of resource poor farmers: a success story. In: Humphreys E. and Bayot R.S. (Editors). 2009. Increasing the productivity and sustainability of rainfed cropping systems of poor smallholder farmers. Proceedings of the CGIAR Challenge Program on Water and Food International Workshop on Rainfed Cropping Systems, Tamale, Ghana, 22-25 September 2008. The CGIAR Challenge Program on Water and Food, Colombo, Sri Lanka. Pp 269 – 278.

Taonda S. J. B., Yagho E., Soubeiga J., Kabré A., 2008. Projet « transfert de la technologie de fertilisation par micro dose et des variétés tolérantes à la sécheresse pour la prospérité des petits producteurs agricoles du Sahel ». Burkina Faso, Rapport final, 2005-2008, 66p.

Traoré A., 2013. Effet de la microdose, des techniques de collecte et gestion des eaux et du warrantage sur le revenu des femmes productrices de niébé dans le Kouritenga et le Zondoma (Burkina Faso). Mémoire de DEA. Université de Parakou/Ecole doctorale pluridisciplinaire. Option : Economie des ressources naturelles. 80p.

Traoré A. Y., 2012. Impacts des pratiques agricoles (rotations, fertilisation et labour) sur la dynamique de la microfaune et la macrofaune du sol sous culture de sorgho et de niébé au centre ouest du Burkina Faso. Thèse de doctorat unique à l'Université Polytechnique de Bobo Dioulasso. 169p.

Twomlow S., Rohrbach D., Dimes J., Rusike J., 2010. Micro-dosing as a pathway to Africa's Green Revolution: evidence from broad-scale on-farm trials. *Nutr Cycl Agroecosyst* 88, pp 3–15.

UA/SAFGRAD., 2010. Recherche et développement agricoles dans les zones semi-arides d'Afrique. Technologies agricoles au Burkina Faso. Recueil des technologies agricoles. 100p.

Vall E., Andrieu N., Beavogui F., Sogodogo D., 2011. Les cultures de soudure comme stratégie de lutte contre l'insécurité alimentaire saisonnière en Afrique de l'Ouest : le cas du fonio (*Digitaria exilis* Stapf). *Cah Agric* 20 : 294-300. Doi : 10. 1684/agr.2011.0499.

Vanlauwe B., Aihou K., Aman S., Iwuafor E.N.O., Tossah B.K., Diels J., Sanginga N., Lyasse O., Merckx R. and Deckers J., 2001. Maize yield as affected by organic inputs and urea in the West African moist savanna. *Agronomy Journal* 93, pp 1191-1199.

Vanlauwe B., Chianu J., Giller K. E., Merckx R., Mkwunye U., Pypers P., Shepherd K., Smaling E., Woomer P. L., Sanginga N., 2010. Integrated soil fertility management: operational definition and consequences for implementation and dissemination. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 4p.

Vanlauwe B., Kihara J., Chivenge P., Pypers P., Coe R., Six J., 2011. Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-saharan African within the context of integrated soil fertility management. *Plant Soil* 339, pp 35-50.

Walkley A. and Black J.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromatic acid titration method. *Soil Science* 37, pp 29-38.

Zougmore R., ZIDA Z., Kambou N. F., 2003. Role nutrient amendements in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil and Tillage Research* 71, pp 143-149.

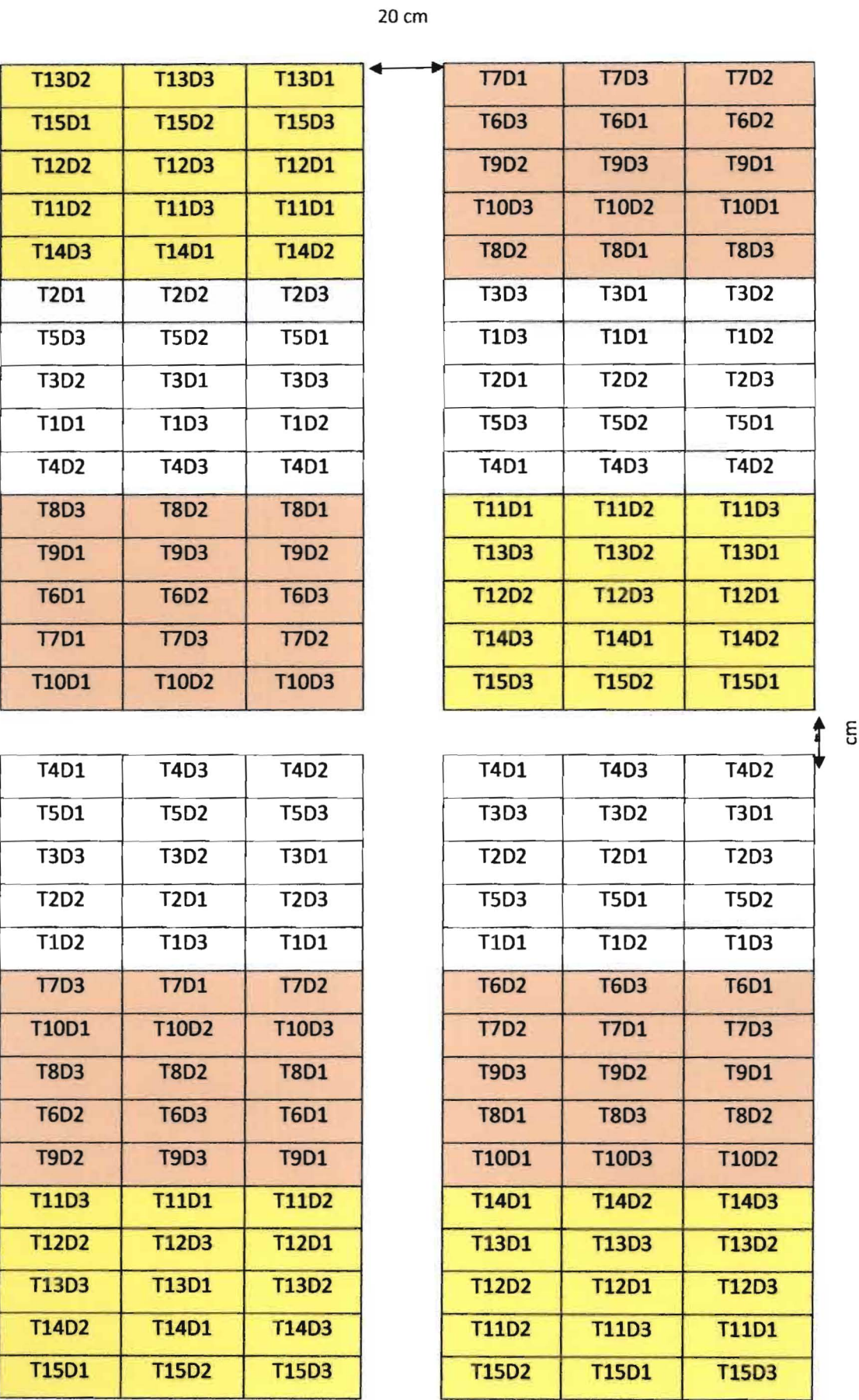
Zougmore R., Ouattara K., Mando A., Ouattara B., 2004. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zai et demi-lunes) au Burkina Faso. *Sécheresse* n°1, vol 15. 8p.

Annexes

Annexe 1 : Effets des traitements sur la floraison du sorgho

Traitements	Pourcentage de plants en épiaison											
	52 JAS	55 JAS	57 JAS	59 JAS	61 JAS	63 JAS	66 JAS	69 JAS	71 JAS	74 JAS	76 JAS	80 JAS
0 MO + 0 NPK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12,5	12,5
0 MO + 1,5 NPK	0	0	0	0	12,5	12,5	12,5	12,5	37,5	37,5	50	75
0 MO + 2 NPK	0	0	0	0	0	25	25	25	62,5	62,5	75	87,5
0 MO + 2,5 NPK	0	0	0	0	0	12,5	12,5	12,5	87,5	87,5	100	100
0 MO + 3NPK	0	0	0	0	12,5	12,5	37,5	37,5	50	50	62,5	75
5 MO + 0 NPK	0	0	25	37,5	62,5	87,5	87,5	100	100	100	100	100
5 MO + 1,5 NPK	12,5	37,5	75	75	75	75	75	75	75	87,5	87,5	87,5
5 MO + 2 NPK	0	0	0	62,5	87,5	100	100	100	100	100	100	100
5 MO + 2,5 NPK	12,5	25	50	75	75	75	75	75	100	100	100	100
5 MO + 3 NPK	0	0	25	75	87,5	87,5	100	100	100	100	100	100
10 MO + 0 NPK	0	0	50	62,5	87,5	100	100	100	100	100	100	100
10 MO + 1,5 NPK	25	37,5	62,5	87,5	100	100	100	100	100	100	100	100
10 MO + 2 NPK	0	0	0	37,5	37,5	87,5	87,5	87,5	100	100	100	100
10 MO + 2,5 NPK	62,5	62,5	62,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10 MO + 3 NPK	12,5	50	62,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Annexe 2 : Dispositif du fonio



Annexe 3 : Dispositif expérimental du sorgho



Annexe 3 : Effets de la combinaison matière organique - NPK sur la biomasse du fonio

Traitements	Biomasse aérienne	Biomasse racinaire	Biomasse
		mg/pot	totale
0 t/ha MO + 0 g/poquet NPK	167	110,7 f	277 l
0 t/ha MO + 1,5 g/poquet NPK	519	294,3 cde	813 i
0 t/ha MO + 2 g/poquet NPK	657	331,4 c	998 fg
0 t/ha MO + 2,5 g/poquet NPK	660	282,4 cde	942,4 gh
0 t/ha MO + 3 g/poquet NPK	702	364,1 c	1066,1 de
5 t/ha MO + 0 g/poquet NPK	353	184,1 ef	537 k
5 t/ha MO + 1,5 g/poquet NPK	652	357,5 c	1010 ef
5 t/ha MO + 2 g/poquet NPK	754	332,6 c	1087 d
5 t/ha MO + 2,5 g/poquet NPK	765	336,1 c	1101 d
5 t/ha MO + 3 g/poquet NPK	892	384,1 bc	1276,1 ab
10 t/ha MO + 0 g/poquet NPK	408	229,6 de	637 j
10 t/ha MO + 1,5 g/poquet NPK	585	337,6 c	923 h
10 t/ha MO + 2 g/poquet NPK	771	436,6 ab	1207,6 c
10 t/ha MO + 2,5 g/poquet NPK	758	467,4 ab	1225,4 bc
10 t/ha MO + 3 g/poquet NPK	830	499,8 a	1329,8 a
Probabilité P	0,688	0,006	0,027
Signification	NS	HS	S

Annexe 4 : Effets de la combinaison matière organique – NPK sur les rendements du sorgho

Traitement	Poids paille (g.pot ⁻¹)	Poids grains (g.pot ⁻¹)
0 MO x 0 NPK	13,3 ± 2,3	4,87±2,3
0 MO x 1,5 NPK	16,97 ± 2,42	14,05±2,3
0 MO x 2 NPK	20,6 ± 3,3	14,18±5,3
0 MO x 2,5 NPK	22,37 ± 2,86	16,87±2,4
0 MO x 3 NPK	28,35 ± 2,97	15,65±4,5
5 MO x 0 NPK	19,47± 1,93	14,28±4,7
5 MO x 1,5 NPK	25,29 ± 3,13	20,9±2
5 MO x 2 NPK	30,12 ± 4,31	21,17±4
5 MO x 2,5 NPK	32,48 ± 3,59	20,45±5,1
5 MO x 3NPK	32,86 ± 3,89	21,82±7,7
10 MO x 0 NPK	26,5 ± 4,33	18,37±3,7
10 MO x 1,5 NPK	28,19 ± 3,34	23,1±1,9
10 MO x 2 NPK	31,98 ± 8,20	21,95±11,7
10 MO x 2,5 NPK	31,4 ± 3,28	29,36±3,3
10 MO x 3 NPK	32,74 ± 5,05	30,12±3,1
LSD	5,155	6,886
Fr probabilité	0,279	0,688
Signification	NS	NS