

L'association sorgho/niébé au poquet, une pratique traditionnelle en zone soudano-sahélienne à faible rendement: Etat des lieux et pistes d'amélioration

[Sorghum and cowpea intercropping, a traditional practice in sudano-sahelian zone with low crop yields: What farmers are doing and potential improvements]

Aminata Ganeme¹⁻²⁻³, Jean-Marie Douzet⁴⁻⁵⁻⁶, Salifou Traore¹⁻⁷, Julie Dusserre⁴⁻⁵⁻⁶, Roger Kabore⁸, Hyacinthe Tirogo⁸, Omar Nabaloum⁸, Nestor Wend-Zoodo Simplicie Ouedraogo⁸, and Myriam Adam³⁻⁵⁻⁹

¹Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre (UFR, SVT), Université Joseph Ki-Zerbo, 09 BP 848, Ouagadougou, Burkina Faso

²Centre d'Etudes Régionales pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERASS), BP 3320, Thiès, Sénégal

³CIRAD, AGAP, Univ Montpellier, INRA, Montpellier SupAgro, 34398 Montpellier Cedex5, France

⁴UPR AIDA, Centre de Coopération Internationale pour la Recherche Agronomique et le Développement (CIRAD), BP596, Ouagadougou, Burkina Faso

⁵Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole (INERA), 04 BP 8645, Ouagadougou, Burkina Faso

⁶AIDA, Univ Montpellier, CIRAD, 34398, Montpellier cedex 5, France

⁷LMI-IESOL, Centre de Recherche de Bel Air, BP 3120, Dakar, Sénégal

⁸Association Minim Song-Panga (AMSP), BP 268, Kaya, Burkina Faso

⁹CIRAD, UMR AGAP, BP 910, Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

Copyright © 2021 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Cereal-legume intercropping is a common practice for sustainable agricultural intensification. However, crop yields in intercropping systems remain low in Sahelian and sudano-sahelian regions of Burkina Faso. This study aimed at characterizing the most common intercropping systems of the region, identifying the most limiting factors and do improvement suggestions. Focus group discussions, surveys on 170 households and monitoring of 80 farmer plots were carried out in three municipalities in the Centre-north region of Burkina Faso. The traditional intercropping by sowing cowpea and sorghum in the same seed hole was the most dominant system (98%). Local crop varieties were the most used (92% for sorghum and 67% for cowpea) in this system. Sorghum and cowpea productivities were highly variable and low with an average grain yield of 416 kg/ha and 240 kg/ha, respectively. Multivariate analyses permitted to identify household, soils, and crop management systems typologies. Important discriminating variables were also identified. Among these factors, sorghum yields were influenced by the number of persons in the household ($p=0.001$), number of traditional plowing tools owned ($p=0.002$), type of off-farm activities ($p=0.005$), soil silt content ($p=0.0008$) and soil types ($p=0.01$). While cowpea yields were more influenced by the number of small ruminants ($p=0.03$), number of traditional plowing tools owned ($p=0.008$), types of off-farm activities ($p=0.01$), soil total nitrogen ($p=0.001$) and organic matter contents ($p=0.004$). Management systems proved to have less impact on sorghum and cowpea yields, improvement of system's performance could be achieved by diversifying the varieties used.

KEYWORDS: cereals and legumes intercropping, management practices, soil, family farms, yield, Burkina Faso.

RESUME: Les associations de cultures céréales-légumineuses s'inscrivent dans une logique d'intensification durable. Cependant, dans les zones sahéliennes et soudano-sahéliennes du Burkina Faso, les rendements en association sont

généralement faibles. Notre étude a pour objectifs de caractériser la pratique d'association culturale la plus pratiquée par les producteurs, identifier les facteurs déterminant des rendements et proposer des pistes d'amélioration. Des focus groupes, des enquêtes individuelles auprès de 170 producteurs et un suivi de 80 parcelles paysannes ont été réalisés dans trois communes en zone soudano-sahélienne. Il ressort que l'association traditionnelle du sorgho et du niébé au poquet est dominante à 98%. Elle se pratique essentiellement avec des variétés locales (92% pour le sorgho et 67% pour le niébé). Les rendements sont très variables et faibles avec en moyenne 416 kg/ha de sorgho et 240 kg/ha de niébé. Les analyses multivariées ont permis d'établir des typologies d'exploitations familiales, de types de sol et d'itinéraires techniques culturaux. Des variables significatives de différenciation des rendements ont été identifiées. Le nombre de personnes à charge ($p=0,001$), de daba/houes ($p=0,002$), l'activité secondaire ($p=0,005$), le taux de limon du sol ($p=0,0008$) et les types de sols ($p=0,01$) sont celles qui ont influencé les rendements en sorgho. Tandis que les rendements de niébé ont été significativement influencés par le nombre de petits ruminants ($p=0,03$), de daba/houes ($p=0,008$), l'activité secondaire ($p=0,01$), l'azote total ($p=0,001$) et la matière organique du sol ($p=0,004$). Les pratiques culturales s'étant avérés moins impactant sur les rendements du sorgho et du niébé, l'amélioration des performances du système pourrait passer par une diversification des variétés utilisées.

MOTS-CLEFS: association céréales-légumineuses, pratiques culturales, sols, exploitations familiales, productivité, Burkina Faso.

1 INTRODUCTION

Plus de la moitié de la population africaine est rurale et vit essentiellement de l'agriculture de subsistance [1]. Au Burkina Faso, cette agriculture occupe plus de 80% de la population. Le sorgho (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) et le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) constituent la céréale et la légumineuse les plus cultivées. En 2017, le sorgho représentait 34% de la production céréalière tandis que le niébé représentait environ 50% de la production des légumineuses sur le plan national [2]. Dans les régions sahéliennes et soudano-sahéliennes du pays, ces deux spéculations sont généralement cultivées en association dans les petites exploitations agricoles à but essentiellement alimentaire. Il s'agit d'une pratique culturale ancienne mais qui occupe plus de 80% des superficies emblavées dans la zone [3]. Les superficies occupées par les systèmes associés céréales-légumineuses connaissent une tendance à la hausse depuis les années 80. Elles ont doublé dans la décennie 2000 atteignant ainsi près de 1 500 000 ha [4]. Malgré les avantages agronomiques et écologiques de l'association culturale, le système est considéré improductif au regard des faibles rendements obtenus. En effet, en milieu paysan, les rendements moyens en association sont de 400 kg/ha pour le sorgho et de 200 à 300 kg/ha pour le niébé ([4], [5]). Par ailleurs, des écarts importants de rendement peuvent être notés entre producteurs de la même localité. Ces disparités s'expliquent par des facteurs pédoclimatiques mais aussi par certains facteurs socio-économiques, qui influencent les choix agricoles des producteurs ([6], [7]). Ces choix de pratiques culturales peuvent expliquer les faibles rendements des cultures, si elles ne sont pas adaptées [8].

Ainsi, pour mieux évaluer les facteurs limitants des performances agronomiques des systèmes de culture, il est important d'étudier non seulement les pratiques culturales des producteurs mais aussi leur potentiel socio-économique et les possibles interactions avec le milieu biophysique. Une bonne compréhension de ces interactions permettra de faire des propositions d'optimisation des systèmes de culture et de production en accord avec les savoirs des producteurs et les pratiques adaptées à leur contexte ([4], [9] – [11]). Notre étude a donc pour principal objectif de faire un état des lieux de la pratique de l'association traditionnelle sorgho-niébé en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso afin de proposer des pistes d'amélioration de cette pratique traditionnelle. De façon spécifique, il s'agira de (i) caractériser les types d'association sorgho/niébé pratiqués par les producteurs et de recueillir leurs motivations et leurs avis sur les avantages et inconvénients de l'association, (ii) déterminer les types d'exploitations familiales, les caractéristiques des sols et des itinéraires techniques employés en association à travers une typologie et (iii) identifier les paramètres qui influencent les rendements dans ce système de culture.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 ZONE D'ETUDE

Notre étude a été conduite dans quinze villages de trois communes de la région du Centre-Nord du Burkina Faso. Un échantillonnage stratifié proportionnel au nombre total de villages par commune a servi à déterminer le nombre de villages à enquêter par commune. Ainsi, le nombre de villages concernés par l'étude était de sept dans la commune de Boussouma, six à Korsimoro et deux à Guibaré (Figure 1).

Ces sites d'études sont situés dans la zone climatique soudano-sahélienne caractérisée par l'alternance de deux saisons, une longue saison sèche de huit mois (Octobre à Mai) et une courte saison pluvieuse de quatre mois (Juin à Septembre).

Pendant la campagne agricole de 2017, les communes de Boussouma, Korsimoro et Guibaré ont reçu respectivement 814 mm, 781 mm et 580 mm de pluie, toutes les communes ayant subi un début de saison tardif. Les températures moyennes annuelles sont généralement comprises entre 20°C et 30°C. Les principaux types de sols rencontrés dans la zone sont les sols ferrugineux tropicaux lessivés (Luvisols, Lixisols), les sols hydromorphes peu humifères à pseudogley (Gleysols et Stagnosols) et les sols peu évolués (Leptosols) sur cuirasse ferrugineuse [12].

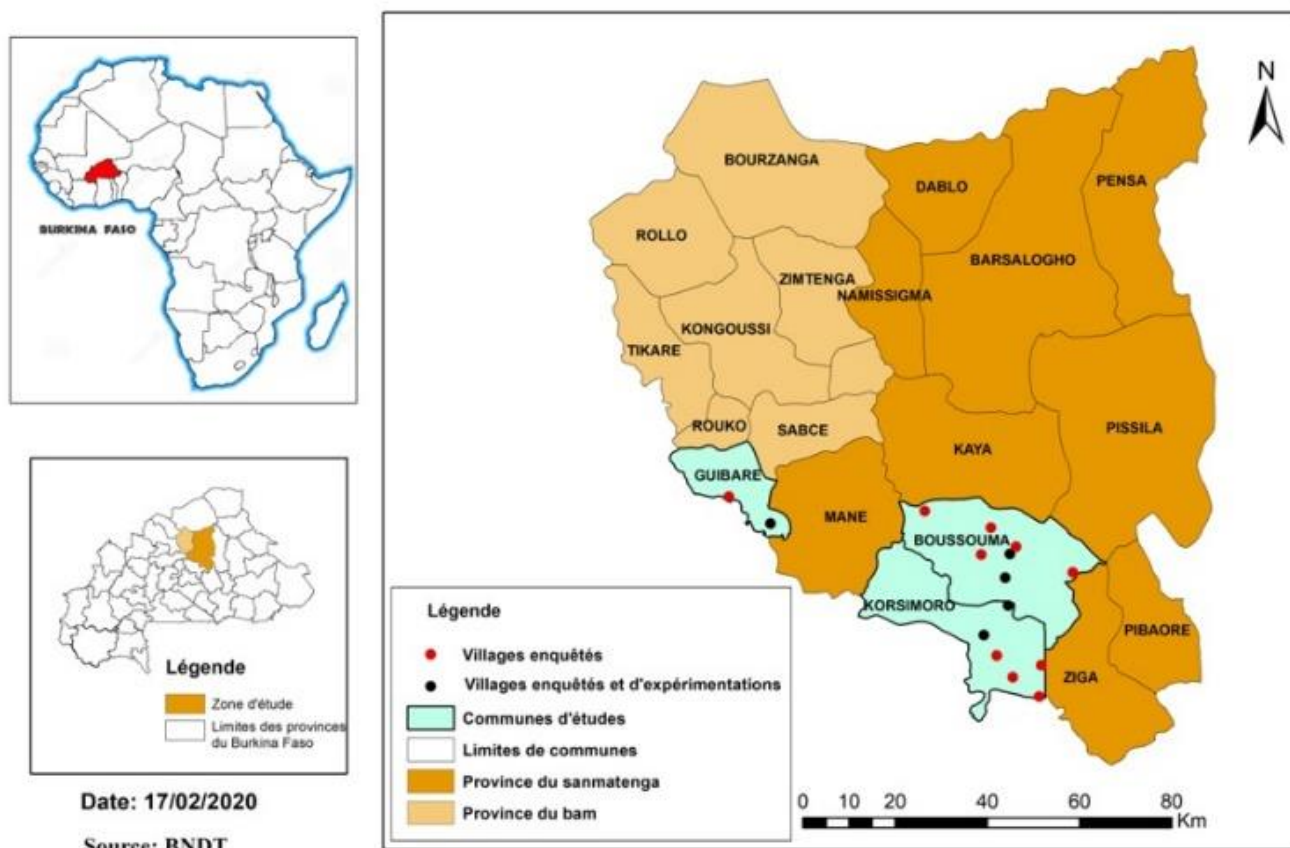


Fig. 1. Présentation de la zone d'étude

2.2 COLLECTE DES DONNEES

2.2.1 CARACTERISATION DES TYPES D'ASSOCIATIONS SORGHO/NIEBE

Des discussions de groupes ont d'abord été organisées dans chacun des 15 villages des trois communes pour collecter des informations générales sur les associations culturelles qui serviront à l'élaboration du questionnaire pour la suite de l'étude. Ensuite, des enquêtes individuelles ont été conduites auprès de 170 producteurs choisis aléatoirement dans les villages. Cela a permis d'identifier les différents types d'associations pratiquées dans la zone, les superficies exploitées, ainsi que les perceptions des producteurs sur les avantages et inconvénients de ces associations. Ces deux activités ont été conduites en mai et juin 2017.

2.2.2 CARACTERISATION DU TYPE D'ASSOCIATION CULTURALE LE PLUS PRATIQUE

Afin de mieux caractériser l'association culturelle la plus pratiquée par les producteurs, une enquête individuelle a été conduite auprès d'un sous échantillon de 80 producteurs choisis aléatoirement dans cinq villages des quinze villages indiqués en rouge dans la figure 1. Les informations recueillies sont la taille de l'exploitation (nombre de personnes à charge et d'actifs), les superficies exploitées, le sexe et le niveau d'instruction du chef de ménage, les activités pratiquées, le nombre de bovins, d'ânes, petits ruminants (ovins, caprins), de volailles et d'équipements (« daba » bêche traditionnelle, houes, charrues, charrettes, pulvérisateurs, rayonneurs, semoirs).

Au sein des champs familiaux de chacun de ces 80 producteurs, une parcelle expérimentale de 320m² (16m x 20m) a été installée. Chaque parcelle a fait l'objet d'une caractérisation physico-chimique des sols. Les prélèvements de sol ont été effectués avant les semis (du 30 mai au 3 juin 2017) à une profondeur de 0-20 cm en cinq points différents sur chaque parcelle pour constituer un échantillon composite destiné aux analyses physico-chimiques. La granulométrie en 3 fractions (argile, limons, sables) a été déterminée par la méthode hydrométrique. Le pH-eau du sol a été déterminé en utilisant un pH-mètre à électrode de verre (rapport sol-eau 2/5). La matière organique a été déterminée par la méthode Walkley and Black. L'azote total et le phosphore total ont été déterminés par la méthode de Kjeldahl. Le potassium total est dosé par la méthode du spectrophomètre à flamme [13]. Ces analyses ont été effectuées en juin 2017 au Laboratoire Sol-Eau-Plante de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles de Ouagadougou (LSEP, INERA). En outre, chaque producteur nous a donné la distance approximative qui sépare sa parcelle de son habitation principale et sa perception du type de sol de sa parcelle.

Enfin, les 80 parcelles ont fait l'objet d'un suivi des pratiques culturales pendant la saison pluvieuse de 2017. Le suivi a consisté à des passages réguliers sur les parcelles expérimentales pour faire des observations et collecter des informations sur toutes les opérations culturales effectuées par les producteurs. Les passages sur les parcelles ont eu lieu jusqu'à la récolte des deux spéculations. Les données collectées pendant le suivi sont les précédents culturaux sur trois ans (2014, 2015 et 2016), les variétés utilisées, le travail du sol, les dates et modes de semis, les écartements entre les poquets et les lignes, les types de fertilisants, leurs quantités et les dates d'application, les poids en grain du sorgho et du niébé par parcelle. Les récoltes intégrales de la parcelle, les séchages et les battages des panicules du sorgho et des gousses de niébé ont été faits par les producteurs eux-mêmes, tandis que les grains ont été pesés avec une balance par l'équipe de suivi des parcelles. Dans le cas d'un mélange de variétés, il n'y a pas eu de séparation au moment de la récolte, le rendement obtenu prend donc en compte les variétés mélangées.

2.3 CALCULS DES DONNEES

Sur la base des écartements entre lignes et poquets mesurés sur le terrain, les densités de poquets à l'hectare (denpoq) ont été déterminées selon la formule ci-après:

$$denpoq = 10\ 000 / (ecart_ligne \times ecart_poq)$$

Avec *ecart_ligne* = écartement entre les lignes en m, *ecart_poq* = écartement entre les poquets en m.

Les quantités de fumure organique appliquées sur les parcelles expérimentales ont été données en nombre de charrettes par les producteurs, une charrette équivalant à 206 kg selon [14]. La matière sèche de la fumure organique a été calculée en utilisant le taux de matière sèche de 76% trouvée par [15] pour les fumures organiques de qualité moyenne. Les quantités de NPK et d'urée ont été fournies en kg. Des extrapolations à l'hectare ont par la suite été faites pour toutes les quantités de fertilisants conformément à la formule suivante:

$$X = Qtéf \times 10\ 000 / Sp$$

Avec *Qtéf*=quantité en kg de fertilisant appliquée sur la parcelle, et *Sp* la superficie de la parcelle (320m²).

La même équation a été utilisée pour le calcul des rendements à l'hectare, en remplaçant *Qtéf* par le poids des grains. Afin d'évaluer la variabilité des rendements de chaque spéculation, un coefficient de variation a été déterminé selon la formule suivante:

$$CV = \sigma \times 100 / \bar{X}$$

σ représente l'écart type et \bar{X} la moyenne des rendements.

2.4 TRAITEMENT ET ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Les données collectées ont permis dans un premier temps de faire une analyse statistique descriptive des perceptions des producteurs et du type d'association le plus pratiqué dans la zone. Dans un second temps, trois typologies différentes (exploitations familiales, sols des parcelles expérimentales et itinéraires techniques) à travers l'analyse factorielle des données mixtes (AFMD) [16] ont été faites. Ces analyses ont permis d'identifier pour chaque typologie, les variables qui contribuent majoritairement à la différenciation des producteurs et déterminent le plus le niveau de rendement. Pour l'ensemble des typologies, la méthode de classification hiérarchique (HCPC) [16] a été utilisée pour l'identification du nombre optimal de types à considérer. Les rendements en sorgho et en niébé, considérés comme variable à expliquer dans notre étude, ont été projetés

en variables quantitatives supplémentaires. Une comparaison des rendements moyens entre les différents types obtenus dans les typologies a été faite en utilisant la fonction de comparaison multiple [17].

Afin de déterminer les effets des variables discriminantes précédemment identifiées dans chaque typologie sur les rendements, des modèles linéaires généralisés (GLM) ont été réalisés, avec la distribution Quasi-poisson afin de pallier la surdispersion des données [18]. Le logiciel Rstudio (version 3.5.0) a été utilisé pour réaliser toutes ces analyses.

3 RESULTATS

3.1 LES TYPES D'ASSOCIATION PRATIQUES ET LES PERCEPTIONS DES PRODUCTEURS

L'association sorgho-niébé est pratiquée par 98,8% des producteurs de la région du Centre-Nord. Les superficies emblavées en cultures associées chez chaque exploitation varient de 25 à 100% de la superficie totale avec une moyenne de 64,3%. Les principaux avantages de l'association évoqués par les producteurs sont le gain de temps au semis (88,8%), la minimisation des risques climatiques par l'assurance de récolte (81,8%), et l'optimisation des terres (58,3%) (Figure 2A). Par ailleurs, la tradition (héritage des savoirs paysans ancestraux) et la bonne gestion des terres ont été évoquées par respectivement 7,1% et 5,3% des enquêtés (Figure 2A). Au niveau des avantages, peu de différences sont notées entre communes. Pour ce qui est des inconvénients, l'importance du temps de sarclage lié au caractère rampant du niébé local (79,4%) et le faible rendement du niébé (62,9%) ont été les plus cités par les enquêtés. Les difficultés de traitement phytosanitaire du niébé ont également été évoquées par les producteurs, notamment ceux de Korsimoro (51,1%) et de Boussouma (37,9%) (Figure 2B). Le faible rendement du sorgho associé a surtout été évoqué par les producteurs de Guibaré (36,1%) (Figure 2B).

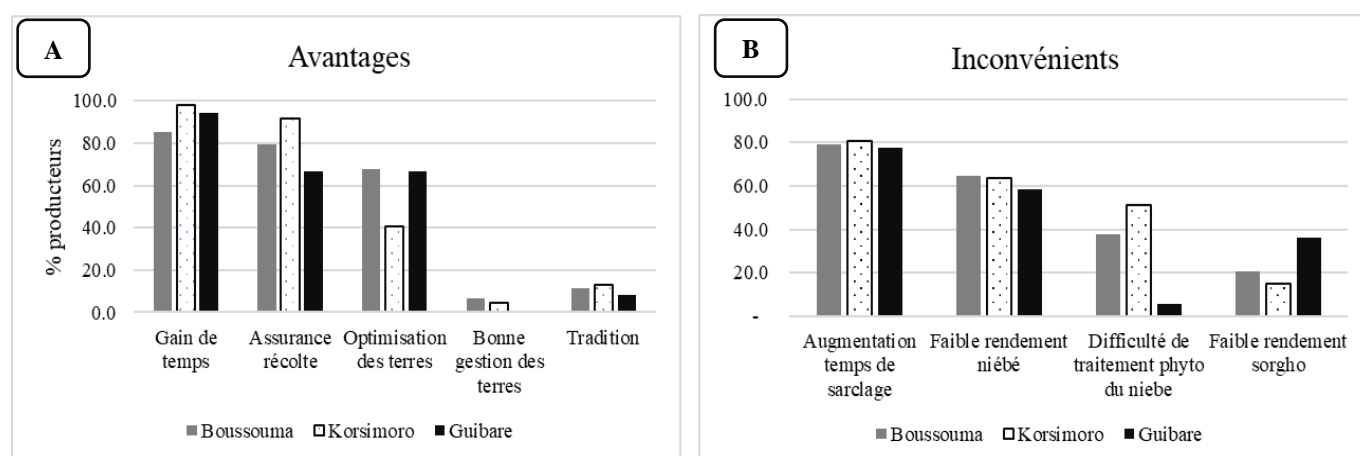


Fig. 2. Perceptions des avantages et inconvénients de l'association culturales selon les communes

Trois types d'associations sont pratiqués dans la zone. Il s'agit de l'association traditionnelle au poquet, de l'association en interligne et de celle en inter-poquet; un producteur peut pratiquer un ou deux types d'associations au sein de son exploitation. L'association traditionnelle au poquet consiste à semer le sorgho et le niébé dans le même poquet. L'interligne et l'inter-poquet sont des associations dites modernes (proposées par la recherche). Elles consistent à intercaler soit les lignes (interligne), soit les poquets (inter-poquet) du sorgho avec du niébé en pur. L'association au poquet est la plus pratiquée avec 98,8% des producteurs dont 88,1% qui la pratiquent exclusivement, 10,1% qui pratiquent le poquet et l'interligne et 0,6% qui font le poquet et l'inter-poquet. L'interligne est pratiquée par 11,3% des producteurs dont 1,2% exclusivement, tandis que l'inter-poquet est pratiqué par seulement 1,2% des enquêtés. La manière de pratiquer l'association au poquet, type d'association la plus courante, est détaillée dans la suite de cette étude.

3.2 CARACTERISATION DE LA PRATIQUE D'ASSOCIATION TRADITIONNELLE AU POQUET DANS LA ZONE D'ETUDE

L'association au poquet étant la plus pratiquée, nous avons suivi 80 parcelles paysannes réparties dans trois communes sur lesquelles cette association est pratiquée pour la caractériser plus précisément. Il en ressort que la production agricole dans les exploitations familiales étudiées, notamment celle du sorgho est essentiellement destinée à la consommation du ménage, mais le surplus de production peut être vendu pour subvenir aux autres besoins de la famille. L'agriculture constitue la principale activité pratiquée par toutes les exploitations (100% sont agriculteurs); 95% des enquêtés pratiquent en plus

l'élevage. Les autres activités répertoriées sont l'artisanat (15%), le commerce (15%), la maçonnerie (2,5%) et l'orpaillage (1,2%). Selon les producteurs, il existe sept principaux types de sols dont les plus représentés sont les sols sableux (33,8%), les argilo-sableux (21,3%) et les sablo-argileux (16,3%). Les autres types sont gravillonnaire (13,8%), sablo-limoneux (7,5%), caillouteux (3,8%) et argileux (3,8%). Sur les trois années précédentes (2014, 2015 et 2016), l'association a été pratiquée tous les ans sur 70% des parcelles. Les rotations sur ces 3 ans ont été observées sur 30% des parcelles. Ces rotations représentent des rotations de céréales (sorgho ou mil) suivi par soit des cultures pures de légumineuses (niébé, arachide 17,5%), soit des cultures pures de céréales (3,8%), soit par d'autres cultures pures (sésame, pastèque 2,5%). La pratique de la jachère n'a été relevée que dans 5 % des parcelles. Le tableau 1 présente toutes les valeurs (moyenne et coefficient de variation) des variables quantitatives recueillies par enquête au sein des communes.

Tableau 1. Caractéristiques des exploitations familiales, sols, et des itinéraires techniques par communes (moyenne \pm coefficient de variation)

| Variables (unité) | Boussouma | Korsimoro | Guibará |
|---|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Nombre de parcelles | 30 | 30 | 20 |
| Pourcentage (%) | 37,5 | 37,5 | 25 |
| Caractéristiques des exploitations familiales | | | |
| Nombre de personnes à charge | 13 \pm 6 | 14 \pm 7 | 14 \pm 6 |
| Nombre d'actifs | 7 \pm 5 | 7 \pm 3 | 8 \pm 4 |
| Nombre de bovins | 1 \pm 1 | 2 \pm 2 | 2 \pm 2 |
| Nombre de petits ruminants | 9 \pm 8 | 10 \pm 9 | 9 \pm 7 |
| Nombre d'ânes | 2 \pm 1 | 1 \pm 1 | 1 \pm 1 |
| Nombre de têtes de volailles | 9 \pm 10 | 11 \pm 9 | 10 \pm 9 |
| Nombre de daba/houe | 5 \pm 2 | 7 \pm 3 | 7 \pm 3 |
| Nombre d'outils de transport (charrette, tricycle) | 1 \pm 1 | 1 \pm 0 | 1 \pm 0 |
| Nombre de petits outillages | 1 \pm 1 | 2 \pm 1 | 2 \pm 1 |
| Superficie totale (ha) | 3,1 \pm 1,4 | 3,8 \pm 1,3 | 3,4 \pm 1,4 |
| Superficie emblavée en association (ha) | 2,1 \pm 1,3 | 2,4 \pm 0,9 | 2,3 \pm 0,9 |
| Caractéristiques des sols des parcelles expérimentales | | | |
| Distance des habitations (m) | 816,7 \pm 838,6 | 1937,8 \pm 1690,7 | 712,5 \pm 1120,8 |
| pHeau | 6,1 \pm 0,8 | 6,2 \pm 0,7 | 6,2 \pm 0,7 |
| Matière Organique (%) | 9,2 \pm 4,3 | 12,7 \pm 7,0 | 12,2 \pm 3,1 |
| Azote total (g/kg) | 0,5 \pm 0,2 | 0,6 \pm 0,3 | 0,5 \pm 0,1 |
| Potassium total (mg/kg) | 765,1 \pm 378,2 | 833,6 \pm 581,5 | 678,4 \pm 313,6 |
| Phosphore total (mg/kg) | 148,0 \pm 92,7 | 163,4 \pm 59,1 | 159,5 \pm 74,8 |
| rapport C/N | 11,9 \pm 2,6 | 12,6 \pm 2,2 | 14,9 \pm 4 |
| Argile (%) | 14,2 \pm 7,1 | 11,4 \pm 6,9 | 19,3 \pm 9,2 |
| Limon (%) | 25,8 \pm 7,8 | 28,0 \pm 12,4 | 30,7 \pm 6,4 |
| Sable (%) | 60,0 \pm 10,8 | 60,6 \pm 15,2 | 50,1 \pm 13,4 |
| Paramètres d'itinéraires techniques | | | |
| Densité de poquets à l'hectare | 25627,2 \pm 7598,5 | 33432,7 \pm 11493,5 | 31919,8 \pm 6365,2 |
| Quantité de fumure organique (t/ha) | 15,9 \pm 6,8 | 8,6 \pm 6,4 | 10,2 \pm 7,8 |
| Quantité de NPK (kg/ha) | 113,6 \pm 101,3 | 92,7 \pm 81,0 | 79,7 \pm 78,2 |
| Quantité d'urée (kg/ha) | 17,7 \pm 32,5 | 5,2 \pm 20,2 | 20,3 \pm 37,0 |
| Nombre de sarclages | 2 \pm 1 | 2 \pm 1 | 2 \pm 1 |
| Rendements en grains sorgho (kg/ha) | 456,7 \pm 268,4 | 535,3 \pm 455,5 | 391,3 \pm 246,2 |
| Rendements en grains niébé (kg/ha) | 244,3 \pm 104,1 | 212,2 \pm 117,8 | 249,2 \pm 106,8 |

L'amendement organique essentiellement constitué de fumure organique (FO), est le type de fertilisant le plus employé en association traditionnelle avec 88,7% des parcelles. Les quantités apportées varient de 2,4t/ha à 29,4t/ha, avec 73,7% des producteurs appliquant des doses supérieures à 6t/ha. Les moyennes de quantité de FO appliquée sont de 15,9t/ha, 8,6t/ha

et 10,7t/ha respectivement dans les communes de Boussouma, Korsimoro et Guibaré (Tableau 1). La fertilisation minérale est à base d'engrais complexe (NPK) et/ou d'urée pendant les sarclages. Le NPK est appliqué par 66,3% des producteurs à des doses de 31kg/ha à 313kg/ha. L'urée est appliquée par 18,7% des producteurs, les doses varient de 46,9kg/ha à 187,5kg/ha. Les moyennes de NPK et d'urée appliquées par commune sont respectivement de 113,6kg/ha et 17,7kg/ha à Boussouma, 92,7kg/ha et 5,2kg/ha à Korsimoro, 79,7kg/ha et 20,3kg/ha à Guibaré (Tableau 1). Les trois types de fertilisation (fumure organique, NPK et urée) ont été appliqués par 16,2% des producteurs alors que 6,2% des parcelles n'ont reçu aucune fertilisation.

Douze variétés de sorgho ont été utilisées en association parmi lesquelles une seule variété améliorée (Tableau 2). Trois variétés de niébé ont été utilisées dont deux locales (Tableau 2). Les variétés locales sont les plus utilisées avec 92 % et 67 % respectivement pour le sorgho et le niébé. Les semences sont préalablement traitées avant semis par tous les producteurs, mais seulement 23,7% d'entre eux utilisent des produits phytosanitaires pendant le stade végétatif des cultures. Des mélanges de plusieurs variétés de sorgho ou de niébé sont réalisés par respectivement 15 % et 2,5 % des producteurs (Tableau 2). Au moment du semis, les semences de sorgho et de niébé sont mélangées avec en moyenne un tiers de niébé dans le mélange. Ainsi, à l'échelle de la parcelle, il y a généralement un tiers de poquets associés. Le nombre de plants par poquet varie entre 3 et 5 pour le sorgho et 1 à 2 pour le niébé. Les poquets de semis sont ordonnés soit en ligne (93,8 %), soit en quinconce (5 %), soit dispersés de façon aléatoire (1,2 %). Les écartements les plus employés pour les semis en ligne sont de 60cm x 60cm (35 %), 80cm x 40cm (22 %) et 80cm x 60cm (15 %). Le labour et le zaï (pratique traditionnelle de récupération des sols) sont pratiqués par respectivement 48 % et 41 % des producteurs, le reste travaille sur billon (6,3 %) ou manuellement à la daba (5 %). L'entretien des cultures et la lutte contre les mauvaises herbes ont été faits principalement par des sarclages manuels à l'aide de la daba. Le nombre de sarclages varie de deux (57,5 %) à trois (42,5 %) en fonction du taux d'enherbement et des conditions d'humidité. Par ailleurs, la présence de plantes parasites du sorgho (*Striga hermontica*) et du niébé (*Striga gesnerioides*) a été notée sur 99% des parcelles.

Tableau 2. Variétés de sorgho (A) et de niébé (B) utilisées dans les parcelles expérimentales

| A. Sorgho | | % de parcelles | Origine | Race botanique | Durée du cycle semis épisaison (jours) | Hauteur estimée (cm) |
|------------------------------------|--|----------------|--------------------|--------------------------|--|----------------------|
| Variétés | | | | | | |
| Rouko | | 26,3 | Locale | <i>Guinea</i> | 59 - 71 | 192 - 346 |
| Pisnou | | 21,3 | Locale | <i>Guinea</i> | 62 - 67 | 296 - 373 |
| Pissopoe | | 15,0 | Locale | <i>Guinea</i> | 62 - 71 | 221 - 327 |
| Baninpelga | | 7,5 | Locale | <i>Guinea</i> | 65 - 69 | 255 - 373 |
| Melange (Mitindaade + Pissopoe) | | 6,3 | Locale | <i>Guinea</i> | 59 - 71 | 196 - 373 |
| Kourboui | | 5,0 | Locale | <i>Guinea</i> | 59 - 66 | 196 - 305 |
| Fiib-miougou | | 2,5 | Locale | <i>Guinea</i> | 63 - 73 | 268 - 382 |
| Gueteb_lagsda | | 2,5 | Locale | <i>Guinea</i> | 64 - 69 | 247 - 332 |
| Mitindaade | | 2,5 | Locale | <i>Guinea</i> | 59 - 66 | 196 - 305 |
| Melange (Mitindaade + Rouko) | | 2,5 | Locale | <i>Guinea</i> | 59 - 71 | 278 - 285 |
| Melange (Zoewongo + Rouko) | | 2,5 | Locale | <i>Guinea</i> | 59 - 71 | 285 - 361 |
| Asseta | | 1,3 | Locale | <i>Guinea</i> | 60 - 65 | 282 - 336 |
| ICSV - 1049 | | 1,2 | Améliorée | <i>Caudatum</i> | 71 - 76 | 137 - 280 |
| Mélange (Mitindaade + ICSV-1049) | | 1,2 | Locale + améliorée | <i>Guinea + caudatum</i> | 61 - 74 | 296 - 373 |
| Mélange (Pisnou + Kazinga) | | 1,2 | Locale | <i>Guinea</i> | 62 - 73 | 270 - 336 |
| Mélange (Zoe-wongo + Kourboui) | | 1,2 | Locale | <i>Guinea</i> | 64 - 71 | 285 - 361 |
| B. Niébé | | % de parcelles | Origine | Port de la tige | Durée du cycle (jours) | |
| Variétés | | | | | | |
| Beng-yaanga | | 91,3 | Locale | Rampant | 65 - 74 | |
| Komcalle | | 2,5 | Améliorée | Semi-érigé | 60 - 62 | |
| Mélange (Beng-raaga + beng-yaanga) | | 2,5 | Locale | Rampant | 64 - 70 | |
| Beng-yaanga spécial | | 1,2 | Locale | Rampant | 65 - 74 | |

Une forte variabilité est constatée au niveau des rendements avec des coefficients de variation moyens de 73,9% et 47% respectivement pour le sorgho et le niébé. Cette variabilité a été plus importante dans la commune de Korsimoro avec des CV de 85% pour les rendements en sorgho et 55,5% pour le niébé. Boussouma et Guibaré ont eu des CV respectivement de 58,8% et 62,9% pour les rendements du sorgho et 42% chacun pour le niébé. Avec un minimum de 28kg/ha et un maximum de 1631kg/ha, le rendement moyen général en sorgho a été de 470 kg/ha. Les rendements moyens du sorgho pour toutes les communes ont été inférieurs à 500kg/ha (Figure 3A). Les rendements en niébé ont varié de 34kg/ha à 571kg/ha avec une moyenne de 233 kg/ha; 52,5% des rendements ont été inférieurs à cette moyenne. Tous les rendements moyens en grains de niébé par commune ont été inférieurs à 300kg/ha (Figure 3B). Nous avons poursuivi l'analyse afin d'identifier les facteurs influençant le plus ces rendements, en réalisant des typologies exploitation, sol et itinéraire cultural, permettant de discriminer les facteurs pouvant expliquer la variabilité des rendements observés.

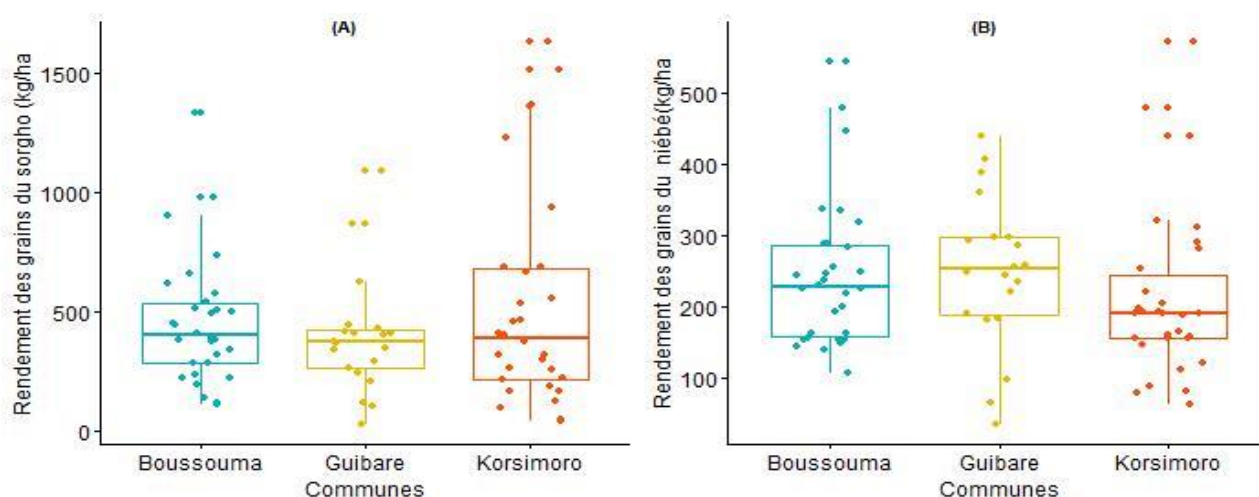


Fig. 3. Boîtes à moustaches des rendements en grains du sorgho (A) et du niébé (A) en fonction des communes

3.3 FACTEURS DETERMINANT LES RENDEMENTS

3.3.1 IDENTIFICATION DES FACTEURS DISCRIMINANTS

Grâce aux typologies d'exploitation, de sols et d'itinéraires culturales (Figure 4), nous avons pu déterminer les facteurs les plus discriminants et potentiellement influant les rendements de sorgho et de niébé. Au niveau de la structure d'exploitation, les deux premiers axes de l'AFMD sur les variables socio-économiques contiennent 37,4% de l'information. L'axe 1 révèle la discrimination des différents types d'exploitation selon le nombre de personnes, de petits ruminants et de daba/houe dans l'exploitation. L'axe 2 est déterminé par le sexe et les activités extra-champêtres (Figure 4A). L'HCPC identifie ainsi cinq groupes d'exploitations familiales (Figure 4B). Les groupes 1 (3,8%) et 2 (17,5%) sont constitués de petites exploitations moins pourvues avec 9 personnes à charge, 6 et 5 actifs, 4 et 5 daba/houes et 3 et 6 petits ruminants respectivement. Les exploitants du groupe 1 sont des hommes pratiquant l'artisanat ou l'orpaillage, ceux du groupe 2 sont majoritairement des femmes, dont la moitié fait le commerce. Les groupes 3 (37,5%) et 4 (18,8%) regroupent les exploitations moyennes avec respectivement 10 et 16 personnes à charge, 5 et 8 actifs, 6 et 7 petits ruminants, et 5 et 7 daba/houe. Principalement des hommes, les producteurs du groupe 4 pratiquent l'artisanat, ceux du groupe 3 n'exercent pas d'activité secondaire. Le dernier groupe 5 (22,5%) est constitué des exploitations les plus nombreuses avec 21 personnes à charge, 12 actifs et les plus pourvues en termes d'équipements, cheptel et superficies exploitées. Les différences de rendements en sorgho et en niébé entre les types d'exploitations familiales ne sont pas significatives ($p > 0.05$).

Au niveau des sols, les deux premiers axes de l'AFMD expliquent 42,2% de la variance totale (Figure 4C). L'axe 1 est corrélé aux teneurs en matière organique et en azote total. L'axe 2 est expliqué par le taux de potassium total, le taux de limon et les types de sols selon la définition des producteurs. Trois groupes de sols sont ainsi formés (Figure 4D) avec des niveaux de fertilité croissants. En effet, le groupe 1 constitué de 32,5% des parcelles, est celui dans lequel se trouve les plus faibles niveaux de fertilité 0,3g/kg Nto; 0,7% MO; 0,1g/kg Pto et 20,1% de limon. Cinq types de sols se trouvent au sein de ce groupe dont les plus représentés sont les sols à texture sableuse. Dans le groupe 2 (43,8%), la fertilité du sol est moyenne (0,5g/kg Nto; 1,1% MO; 0,2g/kg Pto et 29,1% de limon). Les sols argilo-sableux y sont les plus rencontrés. Le groupe 3 (23,8%) quant à lui, est constitué des sols les plus fertiles avec 0,5g/kg Nto; 1,1% MO; 0,2g/kg Pto et 36,1% de limon. Le type de sols majoritaire selon les

producteurs est le type gravillonnaire parsemé de nombreuses pierres de cuirasse. Avec 390,1 kg/ha, le rendement en grains du sorgho du groupe 2 est significativement plus faible ($P=0,03$) que celui des groupes 1 et 3 qui ont eu respectivement 578,6 kg/ha et 421,2 kg/ha. Pour ce qui est des rendements du niébé, aucune différence significative n'est trouvée entre les trois types de sol.

Les deux premiers axes de l'AFMD de l'itinéraire technique (ITK) ne contiennent que 21,9% de l'information. Le premier axe est expliqué par les quantités de fumure organique et minérale tandis que le second est surtout corrélé au travail du sol et à la variété de sorgho (Figure 4E). Trois groupes de pratiques culturales sont ainsi identifiés par le HCPC (Figure 4F). Le groupe 1 (40%) est constitué des parcelles en zaï ou labour ayant reçu peu de fertilisants avec en moyenne 23 kg/ha de NPK et 7,6 t/ha de fumure organique. Les variétés locales de sorgho Pissopoé et Rouko ont été les plus utilisées. Les parcelles du groupe 2 (40%), majoritairement labourées, ont reçu une fertilisation moyenne avec 143 kg/ha de NPK et 11,2 t/ha de fumure organique et la variété de sorgho la plus employée est Rouko. Le groupe 3 (20%) est formé des parcelles ayant reçu les plus fortes fertilisations (154 kg/ha de NPK et 21,1 t/ha de fumure organique) et cultivées en zaï avec la variété locale de sorgho Pissnou. Les rendements en sorgho et en niébé ne sont pas statistiquement différents ($p>0,05$) entre les trois types d'ITK même si le rendement le plus élevé en sorgho (516,4 kg/ha) est obtenu par le groupe 2 et celui du niébé (258,3 kg/ha) par le groupe 3.

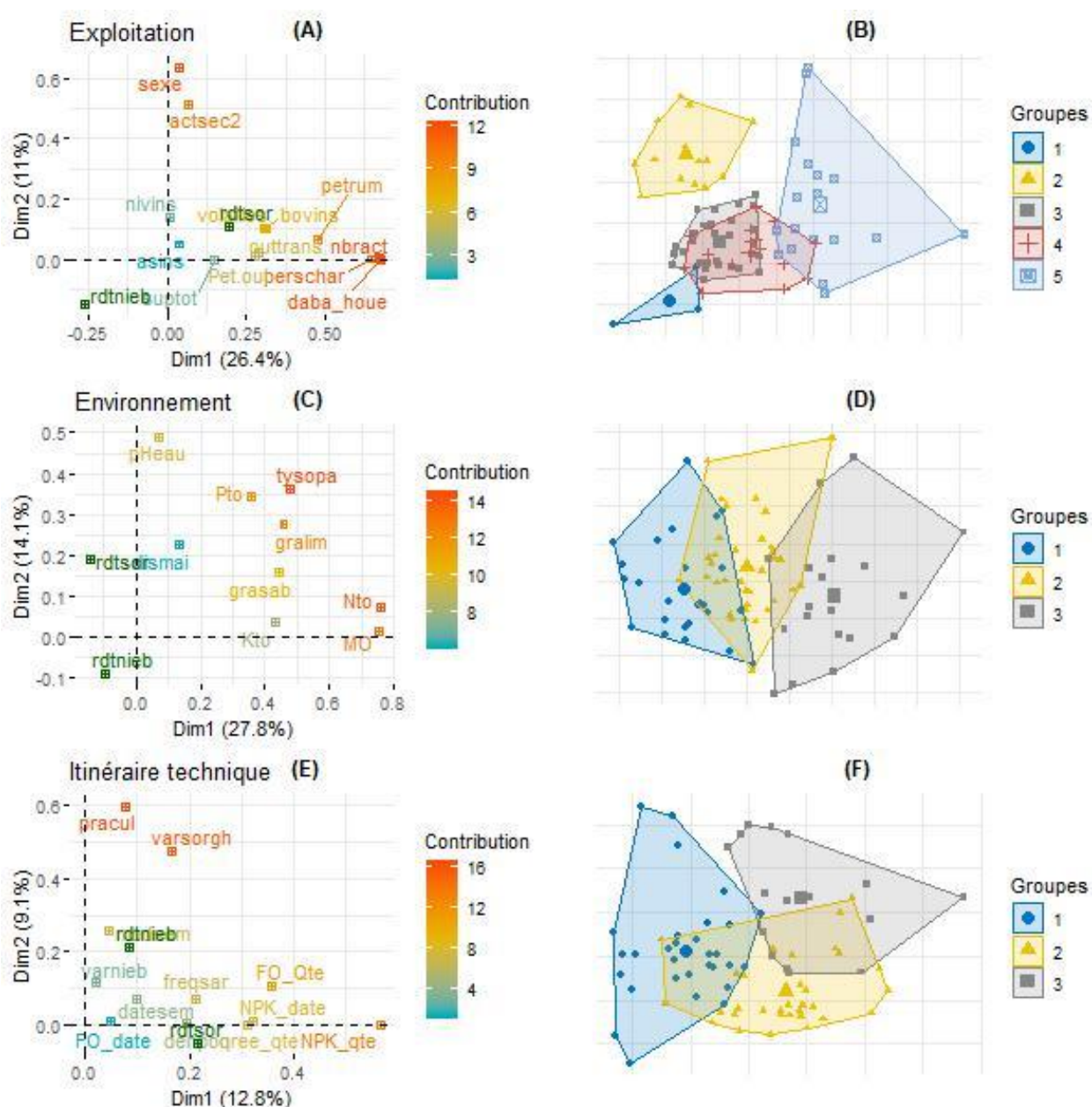


Fig. 4. Typologie des exploitations familiales (A, B), des sols (C, D) et des itinéraires techniques (E, F)

(Exploitations familiales: nivins = niveau d'instruction, perschar = nombre de personnes à charge, nbract = nombre d'actifs, petrum = nombre de petits ruminants, outtrans = nombre d'outils de transport, pet.out = nombre de petits outillages, suptot = superficie totale; Sols: dismai = distance de la parcelle par rapport aux habitations, MO = matière organique du sol, Nto = Azote total, Kto = potassium total, Pto = phosphore total, gralim = taux de limon, grasab = taux de sable, tysopa = types de sol selon la définition des producteurs; Itinéraires techniques: varsorgh = variétés de sorgho, varnieb = variétés de niébé, pracul = travail du sol, datesem = date de semis, modsem = mode de semis, denpoq = densité de poquets de semis, freqsar = fréquence de sarclage, FO_Qte = quantité de fumure organique, FO_date = date d'application de la fumure organique, NPK_qte = quantité de NPK, NPK_date = date d'application du NPK, uree_qte = quantité d'urée, uree_date = date d'application de l'urée)

3.3.2 EFFET DES VARIABLES LES PLUS DISCRIMINANTES SUR LE RENDEMENT

En dépit de ce manque de discrimination sur le rendement au niveau des différents types précédemment identifiés, nous avons pu identifier, parmi les variables les plus discriminantes pour chaque catégorie, des facteurs influant sur les rendements du sorgho ou du niébé. Des effets positifs, significatifs de l'activité extra-champêtre ($p=0,005$), du nombre de daba et/ou houes ($p=0,002$), de personnes à charge ($p=0,001$) et de leurs interactions ($0,0000 \leq p \leq 0,004$) avec d'autres variables comme le nombre d'actifs, de petits ruminants et le genre ont été mis en évidence sur le rendement du sorgho. Contrairement aux rendements en sorgho, des effets négatifs, significatifs de l'activité extra champêtre ($p=0,01$), du nombre de daba/houe ($p=0,008$), de petits ruminants ($p=0,03$) et des interactions ($0,003 \leq p \leq 0,03$) ont été démontrés sur les rendements du niébé. Au niveau des variables des sols, les rendements en sorgho obtenus sur les sols de type gravillonnaire selon les producteurs sont meilleurs ($p=0,01$) que ceux des autres types de sols. Le taux de limon du sol ($p=0,0008$) a également eu un effet négatif sur les rendements du sorgho. Pour le niébé, des effets négatifs significatifs ont été mis en évidence avec l'azote total ($p=0,001$), la matière organique ($p=0,004$) et leurs interactions avec le taux de limon du sol. L'analyse n'a pas permis de mettre en évidence l'effet d'un paramètre d'itinéraire cultural sur les rendements.

4 DISCUSSION

4.1 TYPES D'ASSOCIATION PRATIQUES ET LES PERCEPTIONS DES PRODUCTEURS

Notre étude confirme l'importance de la pratique de l'association traditionnelle céréale/légumineuse dans le même poquet dans la zone soudano-sahélienne ([3], [5]). Les producteurs pratiquent l'association afin de minimiser le risque climatique, en s'assurant la récolte d'au moins une spéculacion. Les systèmes associés sont plus résilients aux différents stressés [19] et permettent de mieux stabiliser les rendements [20] que les cultures pures. En effet, lorsqu'une des spéculacions associées est confrontée à un stress particulier (biotique ou abiotique), la seconde peut bénéficier des ressources disponibles et améliorer ainsi son rendement, ce qui permettra de compenser les pertes subies par la première. Par ailleurs, certains producteurs pratiquent l'association afin de mieux gérer leur espace et maintenir la fertilité du sol. Avec l'effet combiné de la croissance démographique et le développement du secteur minier, les terres arables deviennent de plus en plus rares ([21] – [24]). Cette raréfaction des terres est à l'origine du raccourcissement de la durée de la jachère, voire sa disparition ([25], [26]). Selon les producteurs, l'association au poquet constitue une meilleure stratégie de gestion de l'espace que le système intercalaire où la surface vide laissée après la récolte du niébé est considérée comme une perte. En outre, le mélange des semences au moment du semis en association au poquet permet un gain de temps aux producteurs. Ces raisons justifient le fait que l'association au poquet est la plus employée par les producteurs comparativement aux associations intercalaires recommandées par la recherche.

4.2 CARACTERISATION DU SYSTEME D'ASSOCIATION LE PLUS PRATIQUE

L'association au poquet est pratiquée presque tous les ans avec essentiellement des variétés locales de sorgho et de niébé. Les variétés améliorées sont jugées non adaptées à cette association par les producteurs. Cette prédominance des variétés locales dans les systèmes de cultures paysans a aussi été montrée par [27]. La préférence des variétés locales par les producteurs peut s'expliquer par leur rusticité et leur adaptation à la diversité des systèmes traditionnels de culture et aux divers objectifs de production ([28] – [30]). La fumure organique est le type de fertilisation le plus utilisé avec 87,5% contre 66,2% et 18,7% respectivement pour le NPK et l'urée. De façon générale, les quantités appliquées sont supérieures ce qui a été observé dans d'autres études [3], [31]. Cela peut s'expliquer par la taille réduite des parcelles expérimentales et un investissement, par les producteurs, plus important en intrants sur les parcelles expérimentales que dans les champs familiaux (malgré les recommandations pour gérer ces parcelles au même titre que le reste du champ paysan). Les différences de quantités appliquées pourraient s'expliquer par les moyens (financier et ressources animales) des producteurs mais aussi du travail du sol employé. Les parcelles en zaï sont systématiquement fertilisées avec de la fumure organique et en quantité plus importante du fait de leur concentration dans les poquets de semis.

Les rendements des deux spéculations dans cette association traditionnelle sont très variables d'un producteur à l'autre avec des coefficients de variation très élevés. Cette grande variabilité des rendements en milieu paysan avait également été montrée par plusieurs auteurs dont notamment [32] au Mali et [6] au Sénégal, au Brésil et au Vietnam. En outre, les rendements sont faibles dans l'ensemble, à l'instar de ceux obtenus dans des systèmes de production traditionnels par [24] dans la même région, [5] dans la région Nord du Burkina Faso. La variabilité et les faibles rendements en Afrique sub-saharienne peuvent s'expliquer par les précédents culturels, la faible fertilité des sols, la variabilité climatique ([4], [32]) et les mauvaises herbes [6]. Dans le cas de notre étude, nous avons pu mettre aussi en exergue un certain nombre de facteurs sociaux-économiques et pédologiques influençant les rendements.

4.3 FACTEURS LIMITANT LES RENDEMENTS

L'AFMD sur les variables des exploitations familiales a montré que les variables importantes de discrimination sont le nombre d'actifs, d'outils traditionnels de sarclage (daba), le nombre de petits ruminants et les activités extra-champêtres. L'importance de ces différents facteurs dans la typologie des producteurs a également été démontrée par [33] en Afrique de l'Est, [24] et [3] au Burkina Faso.

Au niveau des sols, les teneurs en matière organique, en azote total, en phosphore total et en limon ainsi que les types de sols selon les producteurs sont les principaux facteurs de différenciation des parcelles dans notre étude. La variabilité des caractéristiques physico-chimiques des sols dans ces zones soudano-sahéliennes, peut s'expliquer par leur hétérogénéité spatiale, les types d'utilisation des terres et les flux de carbone et de nutriments liés au pâturage et à la fertilisation organique [24], [34].

Notre étude met en exergue l'importance de ces paramètres structuraux des exploitations familiales et paramètres pédologiques pour la productivité. En effet, elle a notamment relevé l'importance des activités extra-champêtres sur les rendements de sorgho, confirmant l'importance de ce facteur sur la gestion des pratiques agricoles [35]. Les activités secondaires extra-champêtres sont pourvoyeuses de revenus supplémentaires aux ménages, pouvant être utilisés dans l'achat d'intrants agricoles. L'analyse a aussi identifié l'importance du type de sol [36] et des caractéristiques socio-économiques des exploitations familiales ([37], [38]) comme facteurs déterminants sur le rendement du sorgho. Pour ce qui est des rendements en niébé, contrairement à nos résultats, [32] avaient mis en évidence l'importance de la fertilité du sol dans l'accroissement des rendements. De même, [39] ont montré que la composante élevage contribue à une amélioration des rendements à travers la disponibilité de la fumure organique. Du fait de la pauvreté des sols dans la zone subsaharienne en Afrique, l'apport de fertilisant organique est essentiel au maintien de la fertilité des sols et à l'amélioration de la productivité [21]. Par ailleurs, notre étude a montré que certaines variables favorisant les rendements en sorgho ont eu l'effet inverse pour les rendements en niébé. Ce qui pourrait s'expliquer par une forme de compensation entre les espèces associées [20].

Les rendements des deux spéculations ne sont pas statistiquement différents entre les groupes dans toutes les typologies à l'exception de celle des sols. Les plus faibles rendements ont cependant été observés dans le groupe à fertilité moyenne au lieu de celui à faible fertilité. Au niveau des groupes ITK, même si aucune différence significative n'a été trouvée, les meilleurs rendements en sorgho ont été enregistrés dans le groupe 2 et ceux du niébé dans le groupe 3 qui sont les groupes ayant utilisé les plus importantes quantités de fertilisants. Cela témoigne notamment de l'importance du système de gestion de la fertilité du sol adopté par chaque producteur en fonction du type de sol qu'il possède. En effet, les choix de gestion des terres des producteurs sont basés sur les types de sols qu'ils définissent eux même car les producteurs adoptent des pratiques différentes (travail du sol, fertilisation, densité de semis) selon le type de sol ([25], [34], [40]). Cette adaptation des pratiques culturelles aux types de sols par les producteurs pourrait expliquer le fait que les effets des pratiques culturelles sur les rendements n'ont pas été démontrés dans notre étude contrairement aux études de [8] et [32]. Le manque d'impact des ITK pourrait également s'expliquer par une relative homogénéité au niveau variétal, avec plus de 90% des parcelles utilisant des variétés locales pour les deux spéculations.

5 CONCLUSION

La présente étude a mis en évidence la place importante qu'occupe l'association de culture dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. L'association traditionnelle au poquet est pratiquée par la quasi-totalité des producteurs de la région. Elle est pratiquée principalement comme une stratégie de gestion des terres et d'adaptation aux aléas climatiques et biotiques. Elle est pratiquée sur tous les types de sols et par toutes les catégories de producteurs de la zone d'étude. Le nombre de personnes sur l'exploitation, le nombre de petits ruminants, l'importance des équipements ainsi que les activités extra-champêtres des producteurs sont les facteurs de différenciation des exploitations familiales. Les sols sont regroupés selon leur niveau de fertilité et leur perception par les producteurs. La fertilisation, le travail du sol et la variété de sorgho sont essentiellement les variables discriminantes des itinéraires techniques. L'amélioration des performances agronomiques du

système de culture pourrait se baser sur ces paramètres discriminants notamment à travers une diversification des variétés utilisées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants à la Coopération allemande DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst) qui a accordé une bourse de thèse de doctorat au premier auteur. Cette étude a aussi été possible grâce à la fondation Avril qui a financé ce travail via le projet ORACLE (Optimisation des Rotation et Association Céréales et Légumineuses). Les auteurs remercient également tous les producteurs qui ont participé à la collecte des données.

REFERENCES

- [1] A. Bationo, J. Kihara, B. Vanlauwe, B. Waswa, and J. Kimetu, "Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems," *Agricultural Systems*, vol. 94, no. 1, pp. 13–25, 2007.
- [2] MAAH (Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques), "Rapport général des résultats définitifs de la campagne agricole 2017/2018 et des perspectives alimentaire et nutritionnelle," Ouagadougou, 2018.
- [3] K. F. Zongo, E. Hien, J. Drevon, D. Blavet, D. Masse, and C. Clermont-Dauphin, "Typologie et logique socio-économique des systèmes de culture associant céréales et légumineuses dans les agro-écosystèmes soudano-sahéliens du Burkina Faso," *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 10, no. February, pp. 290–312, 2016.
- [4] M. Dabat, R. Lahmar, and R. Guissou, "La culture du niébé au Burkina Faso : Une voie d'adaptation de la petite agriculture à son environnement?," *Autrepart*, vol. 62, no. 3, pp. 95–114, 2012.
- [5] D. Bambara, J. S. Zoundi, and J. Tiendrébéogo, "Association céréale/légumineuse et intégration agriculture-élevage en zone soudano-sahélienne," *Cahiers Agricultures*, vol. 17, no. 3, pp. 297–301, 2008.
- [6] F. Affholder, C. Poeydebat, M. Corbeels, E. Scopel, and P. Tittone, "The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics : Assessment and analysis through field surveys and modelling," *Field Crops Research*, vol. 143, pp. 106–118, 2013.
- [7] M. K. van Ittersum, K. G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittone, and Z. Hochman, "Yield gap analysis with local to global relevance — A review," *Field Crops Research*, vol. 143, pp. 4–17, 2013.
- [8] D. B. Lobell and J. I. Ortiz-Monasterio, "Regional importance of crop yield constraints: Linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns," *Ecological Modelling*, vol. 196, pp. 173–182, 2006.
- [9] T. Doré et al., "Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis: A review," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 28, pp. 151–161, 2008.
- [10] K. Descheemaeker et al., "Which options fit best? Operationalizing the socio-ecological niche concept," *Experimental Agriculture*, vol. 55, no. S1, pp. 169–190, 2016.
- [11] S. Alvarez et al., "Capturing farm diversity with hypothesis-based typologies: An innovative methodological framework for farming system typology development," *PLoS One*, vol. 13, no. 5, pp. 1–24, 2018.
- [12] Z. Gnankambary et al., *Les classes de sols du Burkina Faso*, Ed : Burea. Ouagadougou, 2015.
- [13] I. Novozamsky, V. J. G. Houba, R. Van Eck, and W. van Vark, "A novel digestion technique for multi - element plant analysis," *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 14, no. 3, pp. 239–248, 1983.
- [14] R. Zougmore, M. Bonzi, and Z. Zida, "Etalonnage des unités locales de mesure pour le compostage en fosse de type unique etanche durable," 2000.
- [15] M. Blanchard, K. Coulibaly, S. Bognini, P. Dugué, and É. Vall, "Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'ouest: Quelles conséquences sur les recommandations de fumure?," *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, vol. 18, no. 4, pp. 512–523, 2014.
- [16] F. Husson, J. Josse, and J. Pagès, "Analyse de données avec R : complémentarité des méthodes d'analyse factorielle et de classification," 2010.
- [17] F. Bretz, T. Hothorn, and P. Westfall, *Multiple Comparisons Using R*. 2011.
- [18] M. J. Crawley, *The R book*, Second ed. United Kingdom: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013.
- [19] E. A. Frison, J. Cherfas, and T. Hodgkin, "Agricultural biodiversity is essential for a sustainable improvement in food and nutrition security," *Sustainability*, vol. 3, no. 1, pp. 238–253, 2011.
- [20] M. Raseduzzaman and E. S. Jensen, "Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis," *European Journal of Agronomy*, vol. 91, pp. 25–33, 2017.
- [21] A. Bationo, J. Kihara, B. Vanlauwe, B. Waswa, and J. Kimetu, "Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems," *Agricultural System*, vol. 94, no. 1, pp. 13–25, 2006.

- [22] B. V. Bado, A. Bationo, and M. P. Cescas, "Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa), " *Biology and Fertility of Soils*, vol. 43, no. 2, pp. 171–176, 2006.
- [23] M. B. Pouya et al., "Pratiques actuelles de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la production du cotonnier et sur le sol dans les exploitations cotonnières du centre et de l'ouest du burkina faso, " *Cahiers Agriculture*, vol. 22, no. 4, pp. 282–292, 2013.
- [24] T. Diarisso, M. Corbeels, N. Andrieu, P. Djamen, J. M. Douzet, and P. Tittonell, "Soil variability and crop yield gaps in two village landscapes of Burkina Faso, " *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 105, no. 3, pp. 199–216, 2015.
- [25] P. Tittonell, B. Vanlauwe, P. A. Leffelaar, E. C. Rowe, and K. E. Giller, "Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya: I. Heterogeneity at region and farm scale, " *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 110, no. 3–4, pp. 149–165, 2005.
- [26] A. S. Lithourgidis, C. A. Dordas, C. A. Damalas, and D. N. Vlachostergios, "Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture, " *Australian Journal of Crop Science*, vol. 5, no. 4, pp. 396–410, 2011.
- [27] C. P. Barro-Kondombo, K. Vom Brocke, J. Chantereau, F. Sagnard, and J. D. Zongo, "Variabilité phénotypique des sorghos locaux de deux régions du Burkina Faso: La Boucle du Mouhoun et le Centre-Ouest, " *Cahiers Agriculture*, vol. 17, no. 2, pp. 107–113, 2008.
- [28] K. vom Brocke, G. Trouche, E. Weltzien, C. P. Barro-Kondombo, E. Gozé, and J. Chantereau, "Participatory variety development for sorghum in Burkina Faso: Farmers' selection and farmers' criteria, " *Field Crops Research*, vol. 119, no. 1, pp. 183–194, 2010.
- [29] K. Vom Brocke et al., "Helping farmers adapt to climate and cropping system change through increased access to sorghum genetic resources adapted to prevalent sorghum cropping systems in Burkina Faso, " *Experimental Agriculture*, vol. 50, no. 2, pp. 284–305, 2014.
- [30] A. Sanou, M. Adam, K. V. Brocke, and G. Trouche, "Bilan Thématique Programmé : Production agricole et sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest : Enquête sur l'adoption et la diffusion des variétés de sorgho issues de la sélection participative dans les régions Centre-Nord et Boucle du Mouhoun : résultats, " Burkina Faso, 2014.
- [31] T. Diarisso, "Analyse des flux de biomasse et des transferts de la fertilité à l'échelle du territoire villageois en Afrique subsaharienne: opportunités d'intégration fonctionnelle agriculture - élevage, " Thèse de Doctorat, Université de Montpellier SupAgro, 2015.
- [32] G. N. Falconnier, K. Descheemaeker, T. A. V. Mourik, and K. E. Giller, "Unravelling the causes of variability in crop yields and treatment responses for better tailoring of options for sustainable intensification in southern Mali, " *Field Crops Research*, vol. 187, pp. 113–126, 2016.
- [33] R. Chikowo, S. Zingore, S. Snapp, and A. Johnston, "Farm typologies, soil fertility variability and nutrient management in smallholder farming in Sub-Saharan Africa, " *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 100, pp. 1–18, 2014.
- [34] F. S. Mairura, D. N. Mugendi, J. I. Mwanje, J. J. Ramisch, P. K. Mbugua, And J. N. Chianu, "Effects of Wildfire, Salvage Logging and Slash, " *Land Degradation & Development*, vol. 19, pp. 77–90, 2007.
- [35] R. Frelat et al., "Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms, " *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA.*, vol. 113, no. 2, pp. 458–463, 2016.
- [36] N. G. Wubeneh and J. H. Sanders, "Farm-level adoption of sorghum technologies in Tigray, Ethiopia, " *Agricultural Systems*, vol. 91, no. 1–2, pp. 122–134, 2006.
- [37] P. Tittonell and K. E. Giller, "When yield gaps are poverty traps : The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture, " *Field Crops Research*, vol. 143, pp. 76–90, 2013.
- [38] G. N. Falconnier, K. Descheemaeker, T. A. Van Mourik, O. M. Sanogo, and K. E. Giller, "Understanding farm trajectories and development pathways: Two decades of change in southern Mali, " *Agricultural Systems*, vol. 139, pp. 210–222, 2015.
- [39] P. Kristjanson, I. Okike, S. Tarawali, B. B. Singh, and V. M. Manyong, "Farmers' perceptions of benefits and factors affecting the adoption of improved dual-purpose cowpea in the dry savannas of Nigeria, " *Agricultural Economics*, vol. 32, no. 2, pp. 195–210, 2005.
- [40] M. Corbeels, A. Shiferaw, and M. Haile, "Farmers' Knowledge of Soil Fertility and Local Management Strategies in Tigray, Ethiopia, " *Managing Africa's Soils*, no. 10, p. 30, 2000.
- [41] F. Affholder, "Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique, " in *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale : vers une gestion des flux hydriques par le système de culture*, Ed. John L., F.-N. Reyniers and L. Netoyo, Eds. Montpellier, 1994, pp. 191–203.