

BURKINA FASO
Unité-Progrès-Justice

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR, DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET DE L'INNOVATION (MESRSI)**

UNIVERSITE NAZI BONI(UNB)

ECOLE DOCTORALE SCIENCES NATURELLES ET AGRONOMIE



N° d'ordre:

THESE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT UNIQUE EN DEVELOPPEMENT RURAL
Option : Systèmes de Productions Végétales
Spécialité : Science du Sol**

Présentée par

Halidou Zeinabou

THEME

Contribution du niébé et des fumures organiques et minérales à la nutrition azotée et aux rendements du mil dans les systèmes de cultures en zone sahélo-soudanienne au Niger.

Soutenue publiquement le 16 juin 2017 devant le jury composé de :

Président : Pr ZOMBRE Prosper, Professeur titulaire, Université de Ouagadougou1, Professeur Joseph Ky-Zerbo, Burkina Faso

Rapporteur : Pr SOMDA Irénée, Professeur titulaire, Université Nazi Boni, Burkina Faso

Examineur : Dr ADDAM Kiari Saïdou, Maître de Recherches, Institut National de Recherche Agronomique du Niger

Co-directeur de thèse : Dr LOMPO François, Directeur de Recherches, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Burkina Faso

Directeur de thèse : Pr NACRO Hassan Bismarck, Professeur titulaire Université Nazi Boni, Burkina Faso

Table des matières

Sigles et abréviations.....	vi
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Remerciements	xi
Résumé	xiv
Introduction générale.....	1
Première partie : Synthèse bibliographique	7
Chapitre I. Modes de gestion de la fertilité du sol	8
1.1. Systèmes de pratiques culturales au Niger.....	8
1.2. Contraintes de la production agricole au Niger.....	11
1.3. Fertilisation minérale.....	15
1.4. Matière organique et fertilisation organique	18
1.4.1. Résidus de culture	19
1.4.2. Fumier de ferme	20
1.4.3. Phospho-compost.....	21
1.5. Fertilisation minérale et organique.....	22
1.6. Systèmes de cultures	23
1.6.1. Rotation légumineuse – céréale.....	23
1.6.2. Association céréale- légumineuse	24
1.7. Fixation biologique de l’azote.....	25
1.7.1. Utilisation des isotopes de N pour mesurer la fixation biologique de l’azote.....	27
1.7.1.1. Utilisation de fertilisants enrichis ou de substrats.....	27
1.7.1.2. Méthode de dilution isotopique au ¹⁵ N (DI).....	27
1.7.2. Recouvrement de l’azote.....	27
1.8. Conclusion partielle.....	28
Chapitre II. Sites d’études	30

2.1. Site de Sadoré.....	30
2.2. Site de Kalapté	34
2.3. Sols.....	38
Deuxième partie : Conduite des études.....	40
Chapitre III. Effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au Sahel	41
3.1. Introduction	41
3.2. Matériel et méthodes	42
3.2.1. Site de l'étude.....	42
3.2.2. Dispositif expérimental	42
3.2.3. Traitements.....	45
3.2.4. Evaluation de la contribution des fumures organo-minérales et du niébé dans la nutrition azotée du mil.....	45
3.2.5. Analyse isotopique	46
3.2.6. Analyses statistiques	47
3.3. Résultats	47
3.3.1. Variation des rendements du mil en fonction des doses et des combinaisons des fumures organo-minérales.....	47
3.3.2. Variation des rendements du mil en fonction des effets combinés de la rotation et des fumures	49
3.3.3. Contribution des fumures organo-minérales et du niébé à la nutrition azotée du mil.	51
3.4. Discussion	55
3.4.1. Effet des doses et des combinaisons des fumures organiques et minérales sur les rendements du mil	55
3.4.2. Effets combinés de la rotation et des fumures.....	56
3.4.3. Contribution des fumures organo-minérales et du niébé sur la nutrition azotée du mil	57
3.5. Conclusion partielle.....	58
Chapitre IV. Impact des modes de gestion de la fertilité du sol et des systèmes de cultures sur la nutrition azotée et les rendements du mil (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.) au Niger	59
4.1. Introduction	59

4.2. Matériel et méthodes	61
4.2.1. Site de l'étude.....	61
4.2.2. Sol.....	61
4.2.3. Matériel végétal.....	62
4.2.4. Fumure	62
4.2.5. Dispositif expérimental	63
4.2.6. Evaluation de la contribution des fumures organo-minérales et du niébé à la nutrition azotée du mil	68
4.2.7. Expression de l'accroissement du rendement (Indice %)	68
4.2.8. Evaluation du Land Equivalent Ratio (LER)	69
4.2.9. Analyses statistiques	69
4.3. Résultats	69
4.3.1. Effet des fumures sur les rendements du mil	69
4.3.2. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du mil.....	70
4.3.3. Effet des fumures organo-minérales et du niébé sur la nutrition azotée du mil.....	72
4.3.4. Effet des systèmes de cultures sur la nutrition azotée du mil.....	73
4.4. Discussion	74
4.4.1. Effet des fumures sur les rendements du mil	74
4.4.2. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du mil.....	77
4.4.3. Contribution des fumures et du niébé à la nutrition azotée du mil	79
4.4.4. Conclusion partielle.....	79
Chapitre V : Evaluation de la fixation biologique de l'azote et du rôle du phosphore dans la production du niébé.....	81
5.1. Introduction	81
5.2. Matériel et méthodes	83
5.2.1. Site de l'étude.....	83
5.2.2. Sols.....	83
5.2.3. Matériel végétal.....	83
5.2.4. Fumure	84

5.2.5. Plan de l'expérimentation et dispositif expérimental	84
5.2.6. Evaluation de la fixation biologique de l'azote par le niébé	84
5.2.7. Analyses statistiques	85
5.3. Resultats	85
5.3.1. Effet des fumures sur les rendements du niébé	85
5.3.2. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du niébé	87
5.3.3. Effet des fumures organo-minérales sur la nutrition azotée du niébé et la fixation biologique.....	87
5.3.4. Effet des systèmes de cultures sur la nutrition azotée du niébé et la fixation biologique.....	89
5.4. Discussion	90
5.4.1. Effet des fumures sur les rendements du niébé	90
5.4.2. Effet du phosphate naturel de Tahoua sur la production du niébé	91
5.4.3. Effet du phospho-compost sur la production du niébé.....	92
5.4.4. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du niébé	93
5.4.5. Effet des fumures organo-minérales sur la nutrition azotée du niébé et la fixation biologique.....	94
5.4.6. Effet des systèmes de cultures sur la fixation biologique et la nutrition azoté du niébé	95
5.5. Conclusion partielle.....	95
Chapitre VI. Discussion générale.....	96
6.1. Quelle est la contribution du niébé et des fumures sur la nutrition azotée et les rendements du mil ?.....	96
6.2. Quel est le rôle du phosphore sur les rendements du niébé ?.....	99
6.3. Quelles sont les stratégies de gestion de la fertilité des sols qui permettront d'améliorer les rendements des cultures ?	100
Conclusion générale, recommandations et perspectives	102
Références bibliographiques	107
Annexes.....	1

Dédicace

Je dédie cette thèse à la mémoire de mon père Halidou Zeno ;

A ma mère, à mes frères et sœurs ;

A mon époux et à mes enfants qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

Sigles et abréviations

AIEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique
AHA	Aménagement Hydro Agricole
ANOVA	Analyse de Variance
AGRA	Alliance pour une Révolution Verte en Afrique
ASS	Afrique sub-saharienne
CEP	Champs Ecoles Paysans
CES/DRS	Conservation des eaux et des sols / Défense et restauration des sols
CILSS	Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CNEV	Catalogue National des Espèces Végétales
CORAF	Conseil Ouest et Centre africain pour la recherche et le développement agricoles
CAU	Coefficient Apparent de l'Utilisation
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CRU	Coefficient Réel de l'Utilisation
DEA	Diplôme d'Etudes Approfondies
DI	Dilution Isotopique
DS	Direction des Statistiques
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FIDA	Fonds International pour le Développement Agricole
GIFS	Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>
HC3N	Haut Commissariat à l'Initiative 3 N
I3N	Initiative les Nigériens nourrissent les Nigériens
IAE	Intensification Agro Ecologique
IARBIC	Intensification de l'Agriculture par les Boutiques d'Intrants Coopératives
ICRISAT	Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi Arides
IDR	Institut du Développement Rural
IFS/CER	Initiative pour la Fertilité des Sols et la Collecte des Eaux de Ruissellement
INERA	Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
INRAN	Institut National de la Recherche Agronomique du Niger
INS	Institut National de la Statistique
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
JAICAF	Association pour la Collaboration Internationale en matière d'Agriculture et de Forêts du Japon

KfW	KfW Development Bank
LER	Land Equivalent Ratio
LE	Land Equivalencies
MA/E	Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage
MDA	Ministère du Développement Agricole
MDA/MRA	Ministère du Développement Agricole/ Ministère de Recherche Animale
MDA/PI/FAO	Ministère du Développement Agricole/ Projet Intrants/FAO
MEF/INS	Ministère de l'Economie et des Finances/ Institut National de la Statistique
MF/INS	Ministère des Finances /Institut de la Statistique
MH /E	Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement
MO	Matière Organique
NDF	Azote qui dérive de l'Engrais
PASADEM	Projet d'Appui à la Sécurité Alimentaire et au Développement dans la région de Maradi
PC	Phospho-compost
PDSFR	Programme du Développement des Services Financiers Ruraux
PN	Phosphates Naturels
PNT	Phosphates Naturels de Tahoua
PPILDA	Projet de Promotion de l'Initiative Locale pour le Développement à Aguié
ProDAF	Programme du Développement de l'Agriculture Familiale
RECA	Réseau National des Chambres d'Agriculture du Niger
VRFA	Valeur de Remplacement en Fertilisant Azoté
UNB	Université Nazi Boni
SPS	Super Phosphate Simple

Liste des figures

Figure 1 : Evolution de la production du mil et sorgho (a) et du niébé (b) au Niger.....	13
Figure 2 : Evolution des rendements du mil, du sorgho (a) et du niébé (b) au Niger	14
Figure 3: Evolution du montant de l'importation des céréales au Niger.....	15
Figure 4 : Carte d'Afrique situant le Niger.....	31
Figure 5 : Localisation du site de Sadoré.....	32
Figure 6 : Pluviosité de Sadoré de 2000 à 2009.....	32
Figure 7 : Pluviosité (a) et nombre de jours de pluie à Sadoré (b).....	33
Figure 8 : Localisation du site de kalapaté.....	36
Figure 9 : Pluviosité (a) et nombre de jours de pluie (b) à Kalapaté.....	37
Figure 10 : Dispositif expérimental du site de Sadoré.....	44
Figures 11 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par la mil en fonction des doses de résidu de récolte en 2008.....	52
Figures 12 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par la mil en fonction des doses de fumie en 2008.....	52
Figures 13 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par la mil en fonction des doses de résidu de récolte en 2009.....	53
Figure 14 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par la mil en fonction des doses de fumier en 2009.....	53
Figure 15 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par la mil en fonction des systèmes de cultures en 2008.....	54

Figure 16 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par la mil en fonction des systèmes de cultures en 2009.....	54
Figure 17 : Dispositif expérimental du site de Kalapaté.....	66
Figure 18 : Plan de l'essai du site de Kalapaté.....	67
Figure 19 : Variation du prélèvement de l'azote par le mil en fonction des modes de gestion de la fertilité du sol (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil	73
Figure 20: Variation du prélèvement de l'azote par le mil (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté par le mil en fonction des systèmes de cultures.....	74
Figure 21 : Variation du prélèvement de N et la fixation de l'azote en kg ha^{-1} (1) et en % (2) par le niébé en fonction des traitements en 2013.....	88
Figure 22: Variation du prélèvement de N et la fixation de l'azote en kg ha^{-1} (1) en % (2) par le niébé en fonction des systèmes de cultures en 2013.....	89

Liste des tableaux

Tableau I : Caractéristiques physiques et chimiques des sols de Sadoré et Kalapaté.....	34
Tableau II : Variation du rendement (kg ha ⁻¹) du mil en fonction des doses des fumures à Sadoré.....	48
Tableau III : Variation du rendement du mil en fonction de la combinaison des fumures à Sadoré.....	49
Tableau IV : Variation du rendement du mil en fonction de la rotation et des fumures à Sadoré.....	50
Tableau V : Variation du rendement du mil en fonction de la rotation et de la combinaison des fumure à Sadoré.....	51
Tableau VI : Composition chimique du phosphate naturel de Tahoua.....	63
Tableau VII : Variation des rendements en grains et paille de mil de l'ensemble des systèmes de cultures comparés en fonction des modes de gestion de la fertilité du sol à Kalapaté.....	70
Tableau VIII : Variation des rendements en grain et paille de mil en fonction des systèmes de cultures à Kalapaté.....	71
Tableau IX : Variation du rendement en fonction des traitements et des systèmes de cultures.....	71
Tableau X : Variation du Land Equivalent Ratio (LER) en fonction des traitements.....	72
Tableau XI : Variation du rendement en graines de niébé en fonction des technologies à Kalapaté.....	86
Tableau XII : Variation du rendement en fane de niébé en fonction des technologies à Kalapaté.....	86
Tableau XIII : Variation de la production du niébé en fonction du système de cultures à Kalapaté.....	87

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à adresser particulièrement nos remerciements à Monsieur Michel Sedogo, Directeur de recherches à l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) de Ouagadougou, pour ses qualités humaines, son sens de travail bien fait et pour avoir soutenu mon inscription.

Nous exprimons nos vifs remerciements à Monsieur Prosper Zombré, Professeur titulaire à l'Unité de Formation et de Recherche en Science de la Vie et de la Terre (UFR/SVT) de l'Université de Ouagadougou 1 Professeur Joseph Ky-Zerbo pour avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury.

Nous adressons tous nos remerciements à Monsieur Hassan Bismarck Nacro, Professeur titulaire à l'Institut du Développement Rural (IDR) de l'Université Nazi Boni (UNB), Directeur de cette thèse. Qu'il trouve l'expression de toute notre reconnaissance pour avoir accepté de suivre nos travaux. Sa constante disponibilité, sa rigueur scientifique, ses judicieux conseils et ses remarques, nous ont été très utiles.

Que Monsieur François Lompo, Directeur de recherche à l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) de Ouagadougou, Co-Directeur de cette thèse, trouve toute notre gratitude pour avoir accepté de diriger nos travaux. Sa grande disponibilité, sa rigueur scientifique, ses conseils et ses critiques nous ont été bénéfiques.

Nos vifs remerciements vont à l'endroit de Monsieur Irénée Somda, Professeur titulaire à l'Institut du Développement Rural (IDR) de l'Université Nazi Boni (UNB) pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'être membre du jury.

Que Dr Zacharie Segda, Maître de recherche à l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) de Ouagadougou, trouve l'expression de tous nos remerciements pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons à adresser tous nos remerciements au Dr Addam Kiari Saïdou, Maître de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN) de Niamey, pour avoir accepté d'être membre du jury pour examiner ce travail.

Nos vifs remerciements vont au Dr Mahaman Sabiou à l'Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN), superviseur technique de ce travail. Il nous a apporté à tout moment, son expertise, ses compétences et de précieux conseils dans l'orientation et la conduite de nos travaux.

Ce travail est le fruit d'une collaboration fructueuse entre l'Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN) et d'autres institutions partenaires : la Fondation Mcknight, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), l'Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-Arides (ICRISAT) et l'Université Abdou Moumouni de Niamey.

Nous avons bénéficié de l'appui financier de la Fondation McKnight. Qu'elle trouve ici notre profonde gratitude et tous nos remerciements.

Monsieur Payne William, Professeur titulaire, Doyen au Collège de l'Agriculture, Directeur de la Section Biotechnologie et Ressources Naturelles à l'Université de Nevada est l'initiateur de ce financement. Nous lui exprimons nos vifs remerciements pour tous les efforts consentis dans l'élaboration de ce travail.

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), à travers les Projets Techniques de Coopération, a assuré la fourniture des isotopes et la prise en charge des analyses isotopiques des échantillons. Nous tenons à les remercier pour leur précieuse contribution.

Nos travaux de DEA et une partie de ceux de la thèse ont été effectués à Sadoré à l'ICRISAT. Nos remerciements s'adressent au personnel de l'ICRISAT, particulièrement au Dr André Bationo pour sa grande expérience et toutes les facilités mises à notre disposition. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons à remercier Dr Vincent Bado ; son expérience, son expertise et son soutien nous ont été bénéfiques dans la réalisation de ce travail.

Que Messieurs Foumakoye Gado et Mamane Almou, Maîtres de conférences à l'Ecole Normale Supérieure de l'Université Abdou Moumouni de Niamey, trouvent ici l'expression de nos vifs remerciements. Leurs critiques, leurs suggestions scientifiques et leur aide nous ont été d'une grande utilité.

Nous tenons à exprimer tous nos remerciements aux responsables de l'INRAN, notamment au Dr Aboubacar Ichaou, Directeur Général et au Dr Salissou Issa, Directeur Scientifique pour leur appui. Nous adressons nos sincères remerciements au personnel du point d'appui de Kalapaté, et à tout le personnel de l'INRAN pour leur soutien.

Nous adressons nos vifs remerciements aux responsables du Projet Recherche-Développement pour la Sécurité Alimentaire et l'Adaptation au Changement Climatique (RED-SAACC) qui ont bien voulu accepter de prendre en charge les frais relatifs à la soutenance.

Nous exprimons tous nos remerciements au Dr Maman Garba, M. Sidi Lawali et à M. Assane Seyni à l'INRAN pour leur appui considérable.

Nos remerciements s'adressent à Dr Serme Idriss de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles de Ouagadougou (INERA) pour tout son soutien.

Nos remerciements vont également à toute personne qui de près ou de loin, a contribué à l'élaboration de cette thèse.

Résumé

Les sols du Niger, à l'image de ceux de la zone sahélienne, sont connus pour leur extrême pauvreté en azote et en phosphore. Les cultures de légumineuses, fixatrices d'azote, sont considérées comme étant une alternative pour améliorer la fertilité des sols et la productivité des systèmes de cultures. Toutefois, peu de données existent sur la contribution en azote des légumineuses et leurs impacts en présence des fumures sur la nutrition azotée des céréales. C'est dans ce contexte que ce travail a été conduit dans les systèmes de cultures à base de niébé, afin d'étudier des modes de gestion intégrée de la fertilité du sol permettant d'améliorer la fertilité du sol et les rendements des cultures en vue de contribuer à la sécurité alimentaire. Il s'est en particulier agi à travers des expérimentations en station, (i) d'évaluer les effets du niébé et des fumures organo-minérales sur la nutrition azotée et les rendements du mil subséquent, et (ii) d'identifier les meilleures modalités de gestion de la fertilité des sols en conditions sahéliennes. Les essais ont été menés de 2008 à 2013 dans la zone sahélo-soudanienne du Niger (Sadoré et Kalapaté). La méthode isotopique de ^{15}N a été utilisée pour déterminer le coefficient réel d'utilisation d'engrais azoté (CRU). Les effets de doses variées de résidus de culture, de fumier et d'engrais minéraux dans une rotation niébé-mil, ont également été évalués. Les résultats ont montré qu'en présence de résidus et de fumier, le CRU a varié respectivement de 16 à 23% et de 16 à 22%. Le CRU du mil subséquent était de 30%, contre 22% pour le mil en monoculture. Le mil subséquent a prélevé du sol 54 kg N ha^{-1} , contre 38 kg N ha^{-1} pour le mil en continu. Les doses des fumures et leur combinaison dans les systèmes de cultures ont augmenté les rendements du mil de 17 à 272%. Les technologies de la micro-dose de NPK, des phosphates, du phospho-compost et du Super phosphate simple, ont augmenté considérablement la production du mil (116 à 299%). La rotation niébé-mil associée à ces technologies, a induit une augmentation du rendement en grain de mil de 40 à 112 % par rapport à la monoculture. La méthode isotopique ^{15}N appliquée à ces technologies dans les systèmes de cultures mil-niébé, a permis de mettre en évidence le rôle important que joue la rotation dans l'absorption de l'azote et son prélèvement du sol. La moyenne des *Land Equivalent Ratio* calculée pour l'ensemble des associations culturales comparées, s'élève à

1,46. Ce qui indique qu'il est plus avantageux de pratiquer l'association des cultures par rapport à la monoculture. Ces technologies améliorent donc la productivité agricole en permettant une utilisation rationnelle de la terre, et une meilleure mobilisation de l'azote du sol. Ainsi, la nutrition azotée et la productivité des systèmes peuvent être améliorées en combinant les fumures organo-minérales et les rotations avec légumineuses.

Mots clés : Céréales, légumineuses, rotation culturale, azote, phosphore, dilution isotopique, phosphates naturels, Land equivalent ratio, Niger.

Abstract

Niger soils like other sahelian zone soils are known to be extremely poor in nitrogen and phosphorus. The crops of legume fixing nitrogen are considered to be a good alternative to improve soil fertility and productivity of production systems. However, few data exist on the nitrogen contribution of legumes and their impacts in the presence of fertilizers on nitrogen nutrition of cereals. It is in this context that, this work was carried out in cowpea-based cropping systems to study integrated management of soil fertility to improve soil fertility and crop yields in order to contribute to food security. It is in particular acted through experiments in station (i) to evaluate the effects of cowpea and organo-mineral fertilizers on nitrogen nutrition and yields of subsequent millet and (ii) to identify the best methods of soils fertility management in Sahelian conditions. The tests were conducted in the Sudano-Sahelian zone of Niger at Sadoré and Kalapaté from 2008 to 2013. The ^{15}N isotope method was used to determine the real utilization coefficient (RUC) of nitrogen fertilizer. The effects of various doses of crop residues, manure and mineral fertilizers in a cowpea-millet rotation were also evaluated. The results showed that in the presence of residues and manure, RUC varied from 16 to 23% and 16 to 22%, respectively. The subsequent millet RUC was 30% against 22% for millet in monoculture. Subsequent millet took from soil 54 kg N ha^{-1} against 38 kg N ha^{-1} for millet in continuous. The fertilizer doses and their combination in cropping systems increased millet yields by 17 to 272%. The technologies of micro-dose, NPK, phosphates, phospho-compost and super simple phosphate have greatly increased millet production (116-299%). The cowpea-millet rotation associated with these technologies induced an increase in grain yield of millet from 40 to 112% compared to monoculture. The ^{15}N isotopic method applied to these technologies in millet-cowpea cropping systems, allowed to highlight the important role of the rotation in the absorption of nitrogen and its take up in soil. The average of *Land Equivalent Ratio* (LER) calculated for all the comparative cultural associations is 1.46. This indicates that it is more advantageous to practice intercropping compared to monoculture. These technologies therefore improve agricultural productivity by enabling rational use of land and better mobilization of soil nitrogen. Thus, nitrogen nutrition and productivity of the systems can be improved by combining the organo-mineral fertilizers and rotations with legumes.

Keywords: Cereals, legumes, intercropping, nitrogen, phosphorus, isotope dilution, rock phosphates, land equivalent ratio, Niger.

Introduction Générale

Contexte

L'agriculture des pays de l'Afrique subsaharienne est caractérisée par une productivité très limitée. La plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest sont tributaires de la production agricole pour leurs moyens de subsistance. Cette production est insuffisante, et a conduit à l'insécurité alimentaire persistante et croissante (Payne, 2006). Dans les zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, les faibles rendements des cultures sont souvent expliqués par les conditions pluviométriques défavorables, la très faible fertilité des sols, et la faible utilisation des engrais (Winterbottom *et al.*, 2013). En outre, du fait de la forte pression démographique, les jachères de longue durée sont de moins en moins pratiquées ; on assiste alors à l'utilisation anarchique des terres marginales impropres à l'agriculture, et à une forme d'exploitation minière généralisée. Buerkert et Hiernaux (1998) indiquent que cette agriculture prélèverait environ 15 kg N ha⁻¹, 2 kg P₂O₅ ha⁻¹ et 15 kg K₂O ha⁻¹. De ce fait, la gestion durable de la fertilité du sol constitue une grande préoccupation en Afrique de l'Ouest (Bationo *et al.*, 2003 ; Winterbottom *et al.*, 2013). Dans la zone du Sahel, cette fertilité du sol constitue un facteur déterminant. Elle influence plus la production agricole et fourragère que la pluviosité. Par leur degré élevé de lessivage et de dégradation, les sols tropicaux de l'Afrique présentent une fertilité naturelle faible, qui s'exprime par le faible niveau de carbone organique (moins de 0,3%), de phosphore assimilable, d'azote et de capacité d'échange cationique (Hamidou, 1997 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Mahamane, 2008). Par ailleurs, ils sont caractérisés par une texture grossière sableuse, et une teneur peu élevée en éléments fins composés de colloïdes minéraux à « charge variable » comme la kaolinite (Mahamane, 2008). A ces conditions physiques et chimiques défavorables, s'ajoute une pluviosité faible et mal répartie dans le temps et l'espace, accompagnée par une température élevée de l'air et du sol (Bationo *et al.*, 1998). Il en résulte une faible production de la biomasse et un taux élevé de décomposition de la matière organique du sol (Bationo *et al.*, 2001 ; Bationo *et al.*, 2003 ; Mkwunye et Bationo, 2011). En outre, les engrais minéraux, très peu disponibles, sont peu ou pas utilisés surtout à cause de leurs coûts onéreux. L'Afrique au sud du Sahara présente le plus faible taux d'utilisation des engrais minéraux : en moyenne 8 kg de fertilisant par hectare, contre 20 kg ha⁻¹ pour la moyenne africaine, et 93 kg ha⁻¹ pour la moyenne mondiale (Mkwunye et

Bationo, 2011 ; Bationo *et al.*, 2012). Avec environ 4 kg ha⁻¹, le Niger est l'un des pays Sahélien qui utilise le moins d'engrais minéral (MDA/PI/FAO, 2006). Pourtant, de nombreuses études ont montré l'importance de l'amélioration de la fertilité du sol pour accroître la production agricole (Bationo *et al.*, 2001 ; Kimani *et al.*, 2003 ; Nandwa, 2003 ; Bationo et Waswa, 2011 ; Bationo *et al.*, 2012 ; Kiba, 2012 ; Winterbottom *et al.*, 2013). L'efficacité des engrais minéraux n'est plus à démontrer. Toutefois, même si de nombreuses études ont montré leur effet positif à court terme, d'autres ont fait ressortir leur effet négatif à long terme sur la dégradation chimique des sols, entraînant de ce fait une réduction de rendement (Mafongoya *et al.*, 2003 ; Koulibaly *et al.*, 2010 ; Bationo *et al.*, 2012). Des stratégies de gestion durable des engrais minéraux doivent alors être développées. Ainsi, la technique de la micro-dose des engrais est pratiquée dans l'objectif de remédier au risque associé à l'utilisation des engrais minéraux dans les conditions de faible humidité du sol, et pour prendre en compte le faible pouvoir d'achat des producteurs (Bationo et Waswa, 2011). De nombreux travaux ont montré que cette technologie est prometteuse pour les producteurs (Bationo *et al.*, 2003 ; Tabo *et al.*, 2007 ; Tabo *et al.*, 2011).

Compte tenu de la déficience presque généralisée en phosphore des sols de l'Afrique tropicale, l'intensification de la production agricole rend nécessaire l'apport de phosphore, non seulement pour augmenter la production agricole, mais également pour améliorer le statut phosphaté du sol afin d'éviter une dégradation supplémentaire (Zapata et Roy, 2004). Cependant, l'utilisation d'engrais phosphatés solubles reste très faible, à cause de leur coût élevé qui les rend inaccessibles aux petits agriculteurs dont le pouvoir d'achat est limité. Paradoxalement, la plupart de ces pays disposent d'importants gisements de phosphates naturels dont la valorisation pourrait contribuer à résoudre les problèmes de carence en phosphore des sols (Johnson, 1995 ; Zapata et Roy, 2004 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Mkwunye et Bationo, 2011). Aussi, l'utilisation de ressources locales disponibles est un important facteur pour le développement d'une agriculture durable. Il faut aussi saluer le fait qu'un intérêt considérable soit porté ces dernières années sur l'utilisation des phosphates naturels (Zapata et Roy, 2004 ; Mahamane, 2008 ; Bationo et Wasswa, 2011).

Pour optimiser leur utilisation comme sources alternatives de P, de nouvelles technologies se sont développées en vue d'accroître la solubilité des phosphates naturels et améliorer leur efficacité agronomique (Bationo *et al.*, 2002 ; Akandé *et al.*, 2005 ; Lompo *et al.*, 2009 ;

Akandé *et al.*, 2010 ; Coraf Action, 2011 ; Bonzi *et al.*, 2011 ; Husnain *et al.*, 2014). Leur faible efficacité par rapport au superphosphate simple, résulte généralement de leur faible solubilité dans l'eau. En vue d'améliorer leur réactivité, ils peuvent être utilisés soit en combinaison avec les engrais phosphatés solubles, soit incorporés dans les systèmes de compostage de la matière organique pour produire du phospho-compost, ou appliqués directement au champ avec la matière organique (Bationo *et al.*, 2002 ; Zapata *et al.*, 2002 ; Zapata et Roy, 2004 ; Akandé *et al.*, 2005 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Akandé *et al.*, 2010, Bonzi *et al.* 2011 ; CORAF, 2011 ; Husnain *et al.*, 2014). Le Niger dispose de deux gisements de phosphates naturels (PN), à Tahoua et au Parc du W. Les PN de Tahoua sont classés parmi les phosphates naturels qui peuvent être utilisés pour une application directe au champ (Truong *et al.*, 1978 ; Bationo *et al.*, 2003 ; Mahamane, 2008 ; Bationo et Waswa, 2011).

Pour améliorer leur efficacité, les engrais minéraux doivent aussi être combinés à la fumure organique. La matière organique est indispensable pour une gestion durable de la fertilité du sol. Elle présente des effets très bénéfiques sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol (Vanlauwe et Giller, 2006 ; Bationo *et al.*, 2012 ; Maltas *et al.*, 2012 ; Ouédraogo *et al.*, 2014). Dans les zones sahéliennes de l'Afrique de l'ouest, les résidus de cultures et le fumier de ferme sont les fumures organiques les plus utilisées. Cependant, l'accès au fumier est limité par l'absence d'une bonne intégration agriculture-élevage. Les pailles de mil qui constituent les résidus de récolte les plus utilisés, font l'objet d'usages multiples les rendant ainsi très peu disponibles pour l'application au champ. Par conséquent, l'utilisation de fumures minérales et organiques demeure faible. Il est alors mieux indiqué de prendre en compte le potentiel des légumineuses dans les systèmes de cultures.

Les légumineuses fixatrices d'azote sont considérées comme étant une alternative viable et rentable. Elles peuvent être complémentaires à l'utilisation d'engrais minéraux pour améliorer la fertilité des sols et la productivité des systèmes de cultures. Zapata (2008) a rapporté que la promotion de l'utilisation des systèmes de production à base de fixation biologique de l'azote, doit être recommandée pour contribuer à l'amélioration de la sécurité alimentaire dans les pays en développement. Au Niger, avec 98,3% des superficies occupées par les légumineuses, le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) constitue la légumineuse la plus cultivée. Sur la superficie totale cultivée en niébé, il est à 97,4 % en association avec d'autres cultures notamment le mil (MDA/MRA, 2008). Le niébé constitue après l'oignon (58%), le

2^{ème} produit agricole exporté, avec 27% de la valeur totale des produits agricoles exportés (MDA/MRA, 2008). Il représente de ce fait l'une des principales sources de revenu monétaire en milieu rural. Le Niger est le principal pays exportateur du niébé (Lambot, 2002) ; il occupe après le Nigeria, le deuxième rang au monde pour la production du niébé (MDA, 2010). Pourtant, le rendement moyen du niébé est de 270 kg ha⁻¹ (MF/INS, 2012), contre un rendement potentiel de 2000 kg ha⁻¹ dans les stations de recherche et chez les gros producteurs de niébé en culture pure (Bationo *et al.*, 2002). Plusieurs contraintes dont les insectes ravageurs, les maladies et la faible fertilité des sols en particulier la déficience en P, affectent la culture du niébé et limitent son rendement. De nombreuses études ont montré l'importance du phosphore dans l'amélioration de la production du niébé et de la fixation biologique de l'azote (Subbarao *et al.*, 2000; Bado, 2002 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Saidou *et al.*, 2007 ; Saidou *et al.*, 2011 ; Bado *et al.*, 2008 ; Nandwa *et al.*, 2011 ; Mmbaga *et al.*, 2014 ; Mulambuila *et al.*, 2015 ;). Par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, les légumineuses peuvent améliorer la disponibilité de l'azote du sol et augmenter le rendement des céréales subséquentes et associées (Subbarao *et al.*, 2000 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2006 ; Bado *et al.*, 2012 ; Omae *et al.*, 2014).

Cependant, peu de travaux ont été effectués sur le rôle des légumineuses dans la fertilité du sol au Niger. La plupart des études se sont très souvent limitées à montrer les effets bénéfiques des légumineuses sur les rendements des céréales. Toutefois, les questions de la contribution effective des légumineuses dans la nutrition azotée du mil, et de leurs impacts en présence de fumures organique et/ou minérale, restent à investiguer. Ces données peuvent en effet être utilisées pour développer des technologies améliorées de gestion durable de la fertilité des sols, permettant ainsi d'améliorer la productivité des systèmes traditionnels. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les présents travaux, qui exploiteront les possibilités offertes par les méthodes isotopiques utilisant l'isotope ¹⁵N (AIEA, 2001; Peoples *et al.*, 2002), pour évaluer l'azote fixé et les contributions en azote des légumineuses et des fumures.

Questions de recherche et hypothèses

La présente thèse dont le thème est «*Contribution du niébé et des fumures organiques et minérales à la nutrition azotée et aux rendements du mil dans les systèmes de cultures en zone sahélo-soudanienne au Niger* », a été construite autour des questions de recherche suivantes :

- Quelle est la contribution du niébé et des fumures sur la nutrition azotée et les rendements du mil ?
- Quel est le rôle du phosphore sur les rendements du niébé ?
- Quelles sont les stratégies de gestion de la fertilité des sols qui permettront d'améliorer les rendements des cultures ?

Notre approche a été bâtie autour de l'hypothèse centrale selon laquelle, une gestion intégrée des fumures minérales et organiques associée au potentiel de fixation de l'azote atmosphérique par le niébé, permet d'améliorer la fertilité du sol et l'efficacité des systèmes de cultures à base de niébé. Plus spécifiquement, l'étude cherche à vérifier les hypothèses suivantes :

- l'azote fixé par les légumineuses améliore la nutrition azotée et les rendements des céréales succédant aux légumineuses ;
- l'azote fixé influence l'utilisation de l'engrais azoté par les céréales subséquentes ;
- l'azote fixé améliore l'utilisation de l'azote du sol par les céréales succédant aux légumineuses.

Objectifs

L'objectif global de ce travail est d'étudier des modes de gestion intégrée de la fertilité du sol dans les systèmes de cultures à base de niébé, permettant d'améliorer la fertilité du sol et les rendements des cultures en vue de contribuer à la sécurité alimentaire.

Il s'est agi plus spécifiquement :

- d'évaluer la contribution du niébé et des fumures sur la nutrition azotée et les rendements du mil ;
- de quantifier la fixation biologique de l'azote ;
- de déterminer le rôle du phosphore sur les rendements du niébé ;

- d'identifier les stratégies de gestion intégrée de la fertilité des sols permettant d'améliorer les rendements des cultures.

Structure générale de la thèse

Après une introduction qui situe le contexte, les hypothèses et les objectifs de ce travail, cette thèse est structurée en deux parties et six chapitres :

- La première partie propose une synthèse bibliographique sur les stratégies de gestion de la fertilité du sol et leur impact sur les caractéristiques du sol et la production agricole (Chapitre I). et donne une description de la zone d'étude (Chapitre II) ;
- La deuxième partie présente les résultats relatifs à l'effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil (Chapitre III), à l'impact des modes de gestion de la fertilité du sol et des systèmes de cultures sur la nutrition azotée et les rendements du mil (Chapitre IV), à l'évaluation de la fixation biologique et du rôle du phosphore dans la production du niébé (Chapitre V). Une analyse synthétique des résultats est proposée (Chapitre VI) avant la conclusion générale, où des recommandations et des perspectives de recherche sont formulées.

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I. Modes de gestion de la fertilité du sol

1.1. Systèmes de pratiques culturales au Niger

Au Niger, les principales spéculations cultivées en zones pluviales sont le mil, le sorgho, le niébé et l'arachide. Le mil (*Pennisetum glaucum* (L.)R.Br.), objet de la présente étude, constitue la principale céréale de base. Il est cultivé sur 3 534 012 ha, soit 78,2 % de la superficie totale cultivée en céréales (4 518 662 ha) (MDA/MRA, 2008). Le mil représente près des trois quarts de la production céréalière, soit environ 3,5 millions de tonnes, faisant du Niger le second producteur régional de cette céréale en Afrique de l'Ouest après le Nigeria (IRD, 2009). Néanmoins, son rendement est faible : il est de l'ordre de 461 kg ha⁻¹ en moyenne (MF/INS, 2012). Le mil est cultivé dans toutes les régions du pays, mais les proportions de superficie cultivée varient selon les régions. Le mil est cultivé pour 76% de sa superficie en association avec d'autres cultures. La superficie du mil cultivée en pur, avec une densité de 10000 poquets par hectare, représente 24 % de la superficie totale cultivée en mil. Cette proportion varie également selon les régions. Les associations qui contribuent le plus à la production du mil sont par ordre d'importance : le mil-niébé suivi par l'association mil-sorgho-niébé, mil-sorgho, mil-niébé-oseille, mil-sorgho-arachide et mil-arachide (MDA/MRA, 2008).

Le mil résiste aux températures élevées. Il tolère la faible fertilité et l'acidité élevée des sols. La majorité des sols dans lesquels le mil pousse dans le Sahel sont des sols à texture grossière avec plus de 65 % de sable. C'est en effet la culture la mieux adaptée aux zones arides et semi-arides. Ainsi, on le trouve souvent dans les zones marginales où les autres céréales comme le maïs ou le blé ne peuvent pas survivre (JAICAF, 2009 ; Wildemeersch, 2014).

L'utilisation des semences améliorées est globalement faible pour l'agriculture pluviale ; seulement environ 4,8 % des producteurs les utilisent. Les produits de traitements ne sont aussi utilisés que sur 11 % des superficies cultivées (MDA/MRA, 2008).

L'engrais organique seul ou en combinaison avec les engrais minéraux, est la pratique de fertilisation la plus couramment utilisée par les producteurs. Cette pratique est utilisée sur 65% de la superficie en zone de maraichage de décrue et sur 61 % en zone d'agriculture

pluviale. L'engrais minéral seul est utilisé sur 31 % de la superficie cultivée en zone de maraichage hors décrue, et sur 3 % uniquement en zone d'agriculture pluviale (MDA/MRA, 2008). Selon MDA/PI/FAO (2016), le pourcentage de producteurs utilisant l'engrais minéral est également faible en culture pluviale (mil 1 %, sorgho 5 %, niébé 3 %).

Au Niger, les sols sont pauvres et fragiles. Ils ne peuvent pas supporter de façon durable une exploitation agricole intensive sans amélioration importante de leur fertilité et sans utilisation de techniques culturales appropriées.. Ainsi, le gouvernement, les institutions de recherche, les ONGs, les projets et programmes de développement, ont conjugué leurs efforts pour mettre au point et valider des techniques en matière de la gestion de la fertilité des sols. Une analyse détaillée de ces techniques dans le cadre de l'Initiative pour la Fertilité des Sols et la Collecte des Eaux de Ruissellement (IFS/CER) a fait ressortir les techniques suivantes (CILSS, 2002) :

- Utilisation de la fertilisation minérale ;
- Utilisation des phosphates de Tahoua ;
- Paillage ;
- Utilisation de compost et ordures ménagères ;
- Fumier de parc et intégration agriculture-élevage ;
- Jachère améliorée ;
- Agroforesterie ; bandes enherbées ;
- Utilisation de l'azolla en culture irriguée ;
- Rotation ou association des cultures et fixation biologique de l'azote ;
- Culture attelée.

Par ailleurs, le Réseau National des Chambres d'Agriculture du Niger, RECA (2013) a rapporté les bonnes pratiques de Conservation des Eaux et des Sols / Défense et Restauration des Sols (CES/DRS). Ce sont des mesures conçues, développées et propagées depuis les années 1980 dans le cadre de projets et programmes de lutte contre la désertification et de gestion des ressources naturelles. Toutes les techniques de lutte contre l'érosion, de récupération et de restauration des terres dégradées ainsi que de captage des eaux de crue ont fait leurs preuves à grande échelle (RECA, 2013). Il s'agit de :

- Demi-lunes (agricoles, pastorales ou forestières) ;

- Tranchées Nardi ;
- Banquettes agricoles et sylvo-pastorales ;
- Pare-feux ;
- Tranchées manuelles ;
- Dignes filtrantes ;
- Fixation des dunes ;
- Cordons pierreux ;
- Diguettes filtrantes ;
- Tassa (appelé Zaï au Burkina Faso)– ;
- Bandes enherbées ;
- Apport de matière organique (fumier, compost) ;
- Paillage (mulching) ;
- Régénération naturelle assistée ;
- Seuils d'épandage ;
- Micro-barrages ;
- Périmètres irrigués villageois.

D'autres programmes ont également entrepris des actions de réhabilitation et de conservation des sols au Niger (GIZ et KFW, 2015).

En ce qui concerne la gestion de la fertilité, de nombreuses études ont montré que l'application de l'engrais minéral et de la fumure organique permettent d'améliorer les rendements du mil (Bationo et Buekert, 2001 ; Bationo *et al.*, 2012). Mais ces pratiques sont faiblement adoptées par les producteurs, car les doses des fumures appliquées sont généralement inférieures aux doses recommandées. Cette situation s'explique par le faible pouvoir d'achat des producteurs, la non disponibilité des fumures et surtout par les coûts élevés des engrais minéraux. Pour y remédier, de nombreux projets ont mis en place le système de boutique d'intrants et de warrantage, tout en appliquant la technologie de microdosage de l'engrais minéral sur le mil et le niébé (Projet intrants FAO, PDSFR, IARBIC, AGRA PASADEM, PPILDA, ProDAF).

Les techniques et technologies efficaces d'augmentation des rendements, appréciées et adoptées par les producteurs, sont vulgarisées à travers les champs-écoles paysans (CEP). Ainsi, sur les 364 CEP animés par le projet IARBIC financé par la FAO entre 2008 et 2011,

l'utilisation de variétés améliorées et fertilisants minéraux combinés à la fumure organique, a permis des hausses de rendements des cultures pluviales variant de 50 à 140% (FIDA, 2015).

En outre, le FIDA s'est associé à l'Initiative "Les Nigériens nourrissent les Nigériens" (Initiative 3N) lancée par le Président de la République en 2012. Ainsi le gouvernement vise à atteindre la sécurité alimentaire et nutritionnelle du pays, à travers l'amélioration de la productivité des cultures vivrières, le développement de la petite irrigation et du petit élevage et l'appui aux mécanismes de résilience aux crises alimentaires. Après trois ans de mise en œuvre de l'Initiative 3N, le Gouvernement a décidé d'accélérer la mise en œuvre du Plan d'investissement de l'Initiative 3N à travers l'adoption d'un Plan d'accélération 2014-2015. Ce dernier comporte sept composantes dont celle relative à la Maison du Paysan conçue pour améliorer la disponibilité, l'accessibilité et assurer la bonne utilisation de certains services essentiels permettant d'améliorer les performances des exploitations agricoles familiales et des entreprises agricoles. Son but est de contribuer à l'amélioration de la disponibilité et à l'accès régulier aux facteurs de production ainsi que d'assurer la promotion de l'utilisation des technologies innovantes éprouvées et adaptées aux réalités locales, afin de réaliser les objectifs fixés par le Plan d'investissement de l'Initiative 3N. La Maison du Paysan représente ainsi un point d'ancrage de l'Initiative 3N au niveau Communal.

1.2. Contraintes de la production agricole au Niger

L'agriculture est le secteur le plus important de l'économie du Niger. Elle représente plus de 40% du produit intérieur brut national, et constitue la principale source de revenus pour plus de 80% de la population (Banque Mondiale, 2013). La performance de ce secteur est néanmoins très instable, du fait de sa forte exposition aux risques.

Le climat de type sahélien, est la plus grande contrainte de la production agricole au Niger. Il est caractérisé par une grande variabilité interannuelle de la pluviosité qui se traduit par des années sèches devenues de plus en plus fréquentes, occasionnant une dégradation accélérée de l'environnement. Les précipitations sont faibles et irrégulières ; les températures et l'évapotranspiration sont très élevées.

Les sols sont en général pauvres en éléments nutritifs et en matière organique. Les sols cultivables sont à 85% dunaires, peu productifs, fragiles, et très sensibles à l'érosion hydrique

et éolienne. Le problème de la fertilité du sol se pose sur toutes les terres. Pourtant, l'utilisation des engrais minéraux reste encore très faible (4 kg ha^{-1} à l'échelle nationale) ; on estime que moins de 4% des superficies cultivées en pluvial reçoivent de l'engrais (SDR, 2006). Dans ces conditions, même si elles sont disponibles, les semences améliorées ne sont pas à mesure d'exprimer leur potentiel productif. En outre la faiblesse de la fertilisation, la réduction des jachères et l'extension des terres de culture par le défrichage de terres marginales favorisent le développement de l'érosion hydrique et éolienne, et ne permet plus d'assurer la restauration et le maintien de la fertilité des sols. De même, le manque d'infrastructures et de politiques agricoles adéquates limite l'accès aux engrais, aux semences améliorées et à une modernisation des techniques agricoles.

Par ailleurs, l'agriculture est essentiellement pluviale, et est dominée par les céréales (mil, sorgho, maïs, riz) et des cultures de rente (niébé, arachide, voandzou, sésame, oseille, souchet, coton). En irrigué, le Niger produit du riz dans les aménagements hydro agricoles (AHA), et des cultures maraîchères dont principalement l'oignon, la tomate, la pomme de terre, le poivron, l'aubergine et le chou. Le potentiel en terres cultivables est estimé à 14,5 millions d'hectares dont seulement 270 000 ha de terres irrigables. Les cultures pluviales occupent près de 8 millions d'hectares, contre seulement 125 000 hectares pour les cultures irriguées (MEF/INS, 2015). Les possibilités d'irrigation sont limitées et faiblement exploitées.

Les pratiques culturales, caractérisées par un faible niveau d'intensification, restent majoritairement manuelles. Elles s'inscrivent dans le cadre d'exploitations familiales de petite taille, tournées presque exclusivement vers l'autosubsistance et utilisant des techniques encore très traditionnelles. La production végétale se pratique donc dans un contexte marqué par un régime pluvial faible et variable, et par une pression forte et croissante exercée sur les terres arables. La conséquence de cette situation est l'insuffisance de la production agricole, ce qui représente une contrainte majeure pour tout développement à moyen et long terme. Les rendements obtenus sont alors faibles et très fluctuants malgré l'utilisation des semences améliorées. Les figures 1 et 2 indiquent l'évolution de la production et du rendement du mil, du sorgho et du niébé. On remarque que la production et le rendement des cultures évoluent en dents de scie, en fonction du régime de la pluviosité. L'augmentation de la production est particulièrement due à l'accroissement des aires cultivées. A partir des années 2000, l'augmentation de la production de niébé, favorisée tant par l'accroissement des superficies que par celle des rendements, correspond à sa rentabilité croissante à l'exportation.

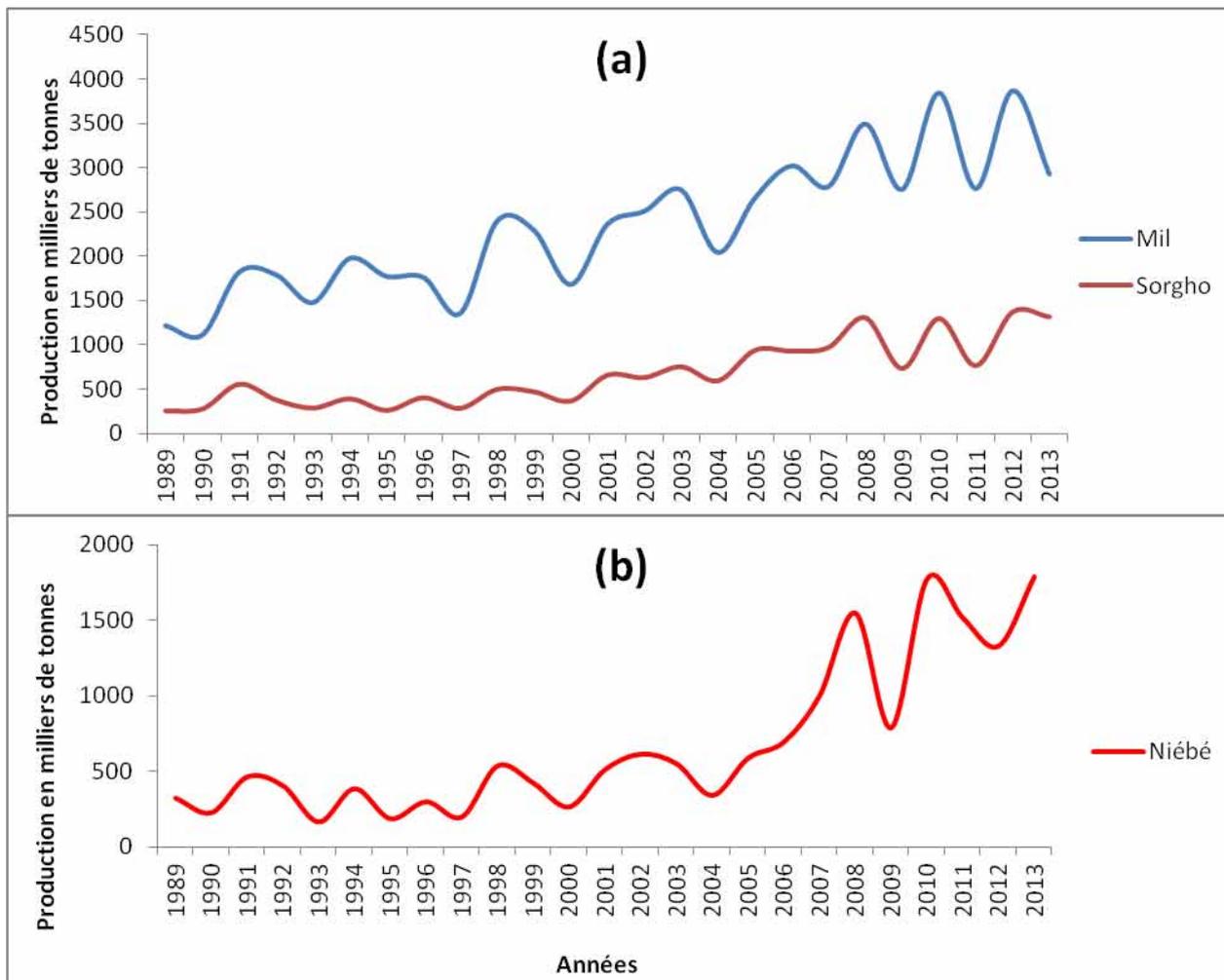


Figure 1 : Evolution de la production du mil et sorgho (a), du niébé (b) au Niger (Source : MEF/INS, 2010).

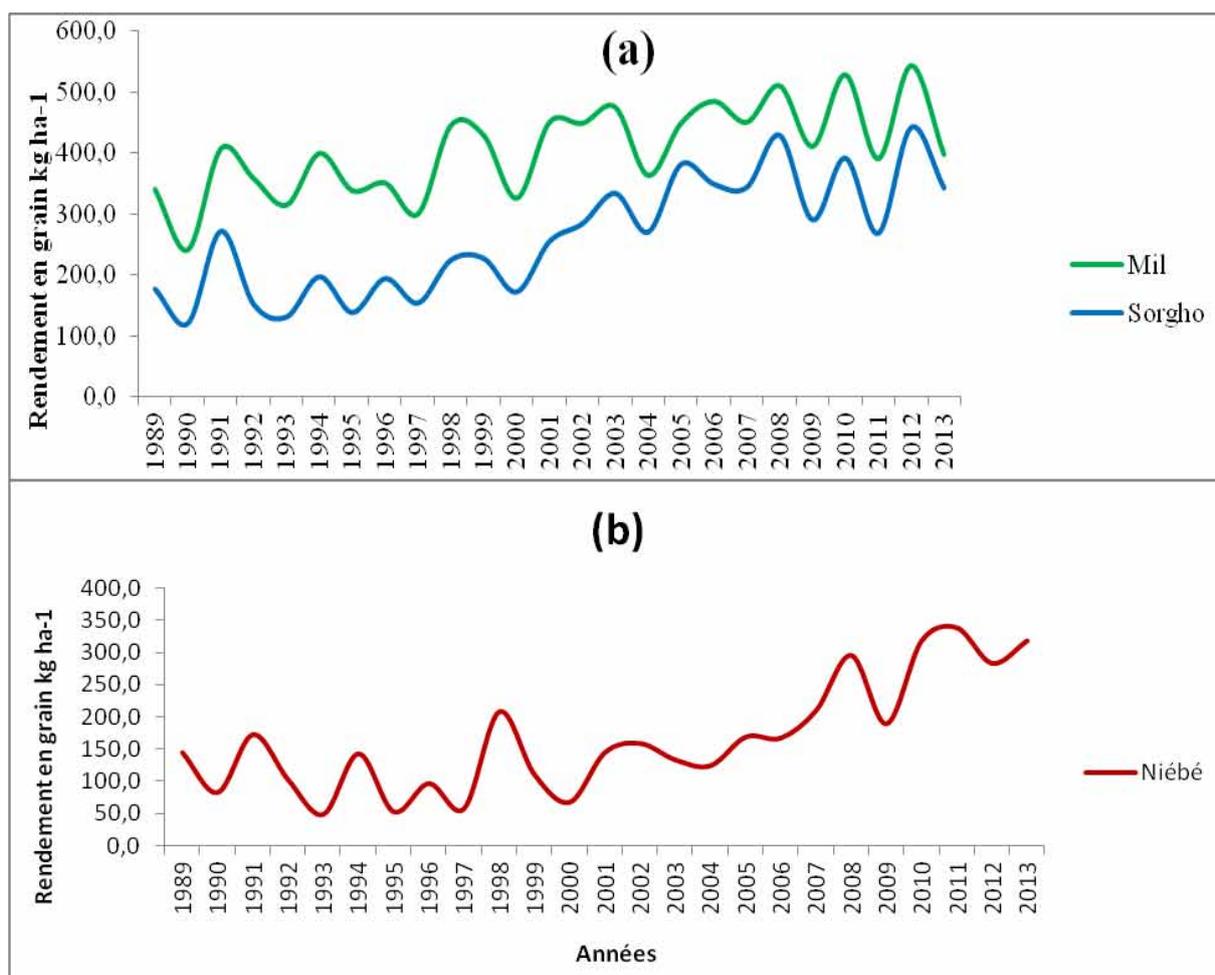


Figure 2 : Evolution des rendements du mil, du sorgho (a) et du niébé (b) au Niger (Source : MEF/ INS, 2010).

Cette instabilité de la production agricole, soutenue par une augmentation rapide de la population avec un taux de croissance de 3,9%, conduit à des situations d'insécurité alimentaire qui se traduisent par des importations considérables des céréales de base (Figure 3). Une intensification de la production agricole s'impose alors, ainsi que le développement de nouvelles technologies pour augmenter la production est nécessaire.

Parmi les contraintes dont souffre la production agricole, figure entre autres le problème de la fertilité des sols. Les sols sont naturellement pauvres et se dégradent progressivement du fait de pratiques culturales inadéquates. Or, une gestion intégrée et durable de la fertilité des sols constitue une condition préalable à l'amélioration de la productivité agricole. La gestion intégrée de la fertilité des sols, communément appelée GIFS, est présentée comme un facteur clé d'amélioration de la faible productivité des sols et des cultures en Afrique, surtout pour les principales cultures vivrières de base (Fairhurst, 2015).

La GIFS est définie comme étant un ensemble de pratiques de gestion de la fertilité du sol, qui comprend entre autres, l'utilisation intégrée d'engrais minéraux, d'intrants organiques et de germes améliorés, combinée avec les connaissances sur la façon d'adapter ces pratiques aux conditions locales, en vue d'optimiser l'utilisation agronomique efficace des nutriments appliqués et par conséquent, l'accroissement du rendement des cultures (Fairhurst, 2015). Breman (1998) a rapporté que l'amélioration de la fertilité des sols est réalisable si les meilleurs éléments de l'agriculture écologique sont utilisés pour optimiser l'utilisation des engrais. La rationalisation de l'utilisation des engrais combinée aux pratiques de l'agriculture écologique, peut conduire à l'Intensification agro-écologique (IAE), voire à l'accroissement durable de la productivité (Inter-réseaux, 2011).

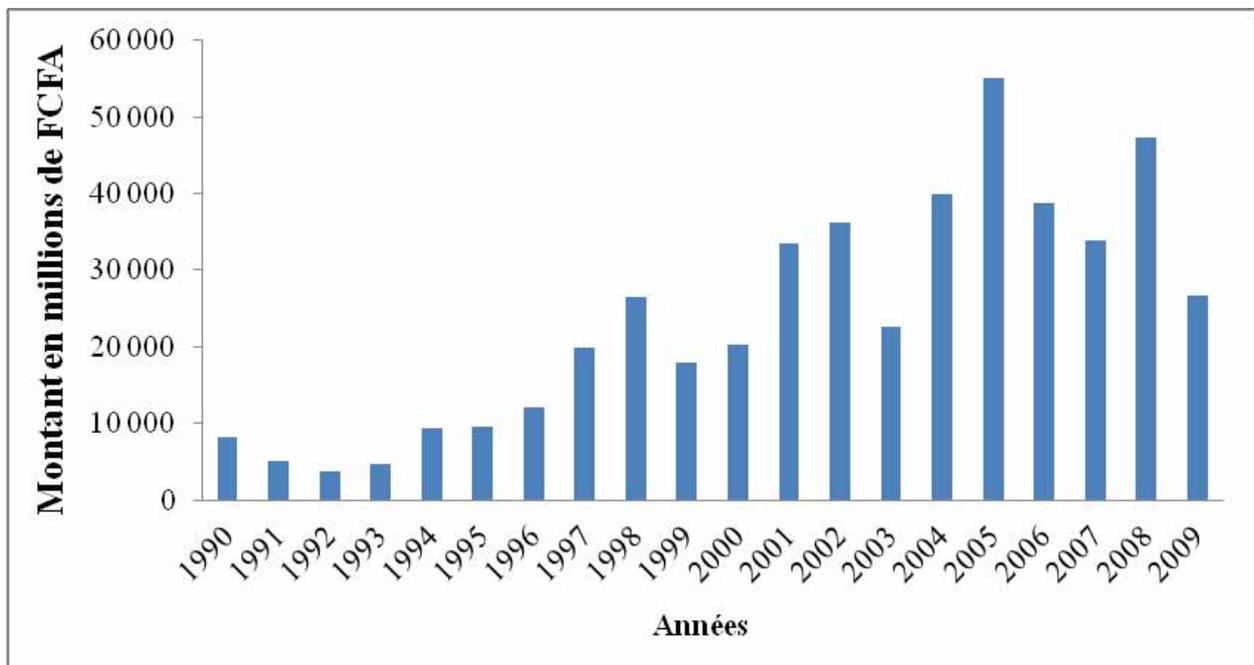


Figure 3: Evolution du montant des importations des céréales au Niger (Source :MEF/INS, 2010).

1.3. Fertilisation minérale

La fertilisation par les engrais minéraux constitue un moyen approprié pour accroître la production agricole. Cependant, le développement de l'utilisation des engrais en Afrique subsaharienne a été lent, en dépit des augmentations importantes de rendement démontrées dans les expériences au champ. En effet, l'utilisation des engrais minéraux permet d'accroître considérablement les rendements des cultures. Bationo *et al.* (2003) ont rapporté qu'une

expérimentation conduite sur le mil à Sadoré au Niger, a donné un rendement moyen du témoin de 179 kg ha⁻¹ contre 909 kg ha⁻¹ pour le traitement NPK (30-30-30 kg ha⁻¹), soit un taux d'accroissement de plus de 300 %. Au Ghana, sur le site expérimental de l'Institut de Recherche en Sol de Kwadoso-Kumasi, des rendements de 3,65 t ha⁻¹ pour le traitement NPK (90-60-60 kg ha⁻¹) et de 2,65 t ha⁻¹ pour le témoin ont été obtenus en 2007 sur le maïs par Fening *et al.* (2011). Lors d'une étude en Inde, Brar *et al.* (2015) ont obtenu un rendement du maïs de 5,1 t ha⁻¹ pour le traitement de 150 kg N ; 32,7 kg P et 31,2 kg K ha⁻¹, contre 2,3 t ha⁻¹ pour le témoin. Les mêmes doses sur le blé ont donné 4,69 t ha⁻¹ contre 1,63 t ha⁻¹ pour le témoin. Certes, les engrais minéraux améliorent les rendements des cultures, mais à long terme, ils présentent des conséquences négatives sur les propriétés chimiques des sols entraînant de ce fait une réduction de rendement (Koulibaly *et al.*, 2010 ; Bationo *et al.*, 2012). D'après Koulibaly *et al.* (2010), en 25 ans de mise en culture du sol, ses caractéristiques chimiques ont été très affectées dans une rotation triennale coton-maïs-sorgho, suite à l'application de la fumure minérale avec une gestion extensive où les résidus sont exportés. Cette fertilisation minérale (engrais solubles et phosphate naturel) qui apporte par an et à l'hectare 46 N, 25 P, 48 K, 18 S et 1 B sur le cotonnier, 74 N, 25 P, 60 K sur le maïs, 46 N et 25 P sur le sorgho, a entraîné la diminution de la teneur en azote du sol de 44 %. La somme des bases échangeables est passée de 3,79 à 1,79 cmol+ kg⁻¹ et la baisse de la CEC est de l'ordre de 16 % (Koulibaly *et al.*, 2010).

Bado (2002) a rapporté qu'en 7 ans de culture à Kouaré au Burkina Faso, la baisse du carbone organique et de l'azote était de 52 à 56 % et de 34 à 58 %, respectivement. Toutes les fumures ont entraîné une baisse du pH-KCl de 0,2 à 0,5 unité ; la fumure minérale NPK acidifiait beaucoup plus le sol avec une baisse du pH-KCl de l'ordre de 0,5 unité. Le même auteur a souligné que l'acidité d'échange des parcelles fertilisées avec l'engrais minéral était 4 fois plus élevée, avec une augmentation de l'aluminium de 6 % par rapport au sol initial.

Cependant, les recommandations de la recherche sur les doses d'engrais minéraux sont très peu suivies en Afrique, en plus d'être dans la plupart des cas très anciennes. Ces engrais sont très peu disponibles, et leurs coûts assez élevés pour les petits producteurs. En moyenne, 8 kg ha⁻¹ an⁻¹ sont utilisés, soit 10 % de la moyenne mondiale. Ainsi, des stratégies de gestion des engrais minéraux se sont développées en vue de l'optimisation de l'efficacité de leur utilisation. La technique de la micro-dose des engrais qui consiste à appliquer de petites

quantités d'engrais au poquet, au lieu de l'épandre à la volée sur toute la surface, est abordable pour les paysans et permet d'accroître l'efficacité de l'utilisation de l'engrais et les rendements des céréales, tout en minimisant le coût. Elle assure un développement rapide de la plante et des racines, permettant ainsi aux cultures de faire face aux stress hydriques de début et de fin du cycle, tout en augmentant les rendements des cultures (Tabo *et al.*, 2007). Cette technologie a été testée avec succès et promue au BurkinaFaso, au Mali et au Niger, avec des résultats encourageants sur le mil et le sorgho, dont les rendements ont augmenté de plus de 120 % (Tabo *et al.*, 2011).

Le développement et l'application d'approches intégrées de gestion des éléments nutritifs dans l'agriculture des pays en voie de développement, doivent impliquer aussi, selon Zapata et Roy (2004), l'utilisation de sources naturelles d'éléments nutritifs tels que les phosphates naturels. Ces derniers étant des matériaux relativement insolubles, la taille de leurs particules a une importance considérable sur leur taux de solubilisation dans le sol. Plus les particules sont petites, plus grande est leur surface de contact avec le sol et en conséquence, plus élevé est leur taux de dissolution. En outre, le nombre de particules par unité de poids de phosphate naturel appliqué, détermine la chance pour les poils absorbants de les rencontrer. Ainsi, l'application de ce type d'engrais finement broyé (habituellement en particules de moins de 0,15 millimètre) augmente son taux de dissolution, la quantité de phosphore libéré et son absorption dans un sol donné. Les phosphates naturels d'origine sédimentaire sont généralement les plus réactifs, et sont donc adaptés à l'application directe (Zapata et Roy, 2004). Le phosphate naturel de Tahoua (PNT) est un de ces gisements reconnus aptes pour une application directe en agronomie (Bationo *et al.*, 2003 ; Bationo *et al.*, 2011). Bationo *et al.* (2003) ont trouvé que l'efficacité agronomique de l'utilisation du PNT sur le rendement de mil est de 76 % par rapport à celle du phosphate super-simple (SSP), alors que le PN du Parc du W n'a présenté qu'une efficacité agronomique de 48 %.

Les importants gisements de phosphates naturels en Afrique de l'Ouest ont fait l'objet de nombreuses études, dans le but de déterminer les conditions de leur valorisation pour l'amélioration de la production et de la productivité agricole (Bationo *et al.*, 2003 ; Zapata et Roy, 2004 ; Akandé *et al.*, 2005 ; Bonzi *et al.*, 2011 ; Coraf Action, 2011 ; Husnain *et al.*, 2014). Outre leur utilisation directe, les investigations ont aussi porté sur leur incorporation dans la préparation des composts, ou leur application directement au champ avec la matière

organique, constituant ainsi un moyen biologique pour améliorer leur efficacité agronomique (Zapata et Roy, 2004 ; Akandé *et al.*, 2005 ; Thuita *et al.*, 2005 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Bonzi *et al.*, 2011 ; Sharif *et al.*, 2013 ; Husnain *et al.*, 2014 ; Mulambuila *et al.*, 2015). Des acidifications partielles des phosphates naturels par l'utilisation des différents acides ont aussi été effectuées et les produits obtenus ont été évalués agronomiquement (Lompo, 1993 ; Zapata et Roy, 2004 ; Mokwunye and Bationo, 2011).

1.4. Matière organique et fertilisation organique

En terme agronomique, la matière organique (MO) fait référence aux produits organiques d'intérêt qui ne sont pas encore enfouis dans le sol. Il s'agit des résidus de récolte, du compost, du fumier, des lisiers et autres, regroupés parfois sous le terme d'amendements ou engrais organiques (Bado, 2002). En agro-pédologie, la MO du sol fait allusion à l'ensemble du matériel organique incluant la litière, la fraction légère, la biomasse microbienne, les produits organiques solubles à l'eau et la MO stabilisée ou humus (Stevenson, 1994). Le maintien de la MO du sol permet d'accroître la durabilité des systèmes agricoles en améliorant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Bonzi, 2002 ; Ouédraogo *et al.*, 2004 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Maltas *et al.*, 2012). Son utilisation est incontournable pour le maintien de la productivité des sols tropicaux (Nandwa, 2003 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Bationo *et al.*, 2012). La fumure organique met à la disposition de la plante, les éléments nutritifs dont elle a besoin à travers le processus de minéralisation et d'humification, qui résulte des activités biologiques des micro-organismes et des conditions environnementales du sol. La MO permet aussi de solubiliser les phosphates, en complexant le calcium dans les sols calcaires, et le fer et l'aluminium dans les sols acides. La présence de la MO influence l'activité biologique (Mando *et al.*, 2005 ; Ouédraogo *et al.*, 2006) qui en retour, contribue à une amélioration des propriétés physiques du sol en favorisant la création d'une structure qui facilite l'enracinement, l'infiltration de l'eau et l'aération. Elle permet aussi de réduire en partie les effets négatifs induits par la fertilisation minérale (Pallo *et al.*, 2006 ; Ouattara, 2009). Dans les zones sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest, les fumures organiques les plus utilisées sont les résidus de culture, le fumier de ferme et le compost, qui sont soit appliqués à la surface du sol comme *mulch*, soit incorporés dans le sol. Il s'avère nécessaire de valoriser ces sources organiques d'éléments nutritifs, pour améliorer et maintenir la fertilité du sol et la production agricole (Mafongoya *et al.*, 2003 ; Bationo *et al.*,

2004 ; Pallo *et al.*, 2006 ; Maltas *et al.*, 2012). Cela est nécessaire car, dans les systèmes agricoles des zones semi-arides de l'Afrique de l'Est et de l'Ouest, le faible revenu des producteurs, le prix élevé des engrais minéraux, le manque de politique publique et d'infrastructures appropriées, empêchent l'utilisation à grande échelle de l'engrais minéral.

1.4.1. Résidus de Culture

Dans les sols sableux des zones sahéliennes, l'apport de résidus de culture sous forme de *mulch* ou incorporés, permet d'agir sur la dégradation chimique, physique et biologique des sols, occasionnée par l'érosion éolienne et hydrique, et par l'action humaine. Apportés au sol, les résidus de culture jouent un rôle important sur le recyclage des éléments nutritifs. A long terme, leur application permet de réduire l'aluminium échangeable, d'améliorer la saturation en base et la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, et de maintenir le niveau de carbone du sol (Bationo *et al.*, 2001). Buerkert *et al.* (2000) ont indiqué que trois ans après l'application à raison de 2 t ha⁻¹, les résidus de récolte ont permis d'améliorer significativement le pH du sol, la teneur en carbone organique, en phosphore, en potassium, et la saturation en bases. Buerkert et Hiernaux (1998) ont rapporté que l'utilisation de résidus de culture permet d'accroître les rendements des cultures. Cette approche d'intensification de la production agricole résulte essentiellement du recyclage et de l'amélioration de l'acquisition des éléments nutritifs par la plante, en particulier K et P. Les deux auteurs ont en effet observé une meilleure croissance des racines. Auparavant, Kretzschmar *et al.* (1991) ont aussi rapporté que l'augmentation du rendement des cultures suite à l'apport de résidus de récolte, est attribuée à l'amélioration de la nutrition en P, promue par le développement des racines.

Les résidus de culture sont également le siège d'importantes activités biologiques qui améliorent les propriétés physiques du sol et la production agricole (Mando *et al.*, 2005; Ouédraogo *et al.*, 2006). Bationo *et al.* (2003) ont rapporté que dans une expérimentation à long terme conduite à Sadoré au Niger, l'application de 2 t ha⁻¹ de résidus de culture augmentait significativement le rendement du mil. Bien que les résidus de cultures jouent un rôle important dans la lutte contre la dégradation des sols dans les zones en marge du désert, leur disponibilité constitue une contrainte car ils font l'objet d'usages multiples (Bationo et Waswa, 2012). Par ailleurs, du fait qu'ils hébergent des œufs d'insectes et des agents pathogènes, les résidus de récolte ont parfois un effet négatif sur la production agricole. Les

pailles provoquent du fait de leur rapport C/N élevé, une immobilisation temporaire des éléments nutritifs surtout l'azote. Fatondji (2002) a rapporté que l'incorporation de matière organique avec un rapport C/N élevé comme les résidus de cultures, peut conduire temporairement à l'immobilisation des éléments nutritifs tout en retardant leur minéralisation.

1.4.2. Fumier de Ferme

Powell et Valentin (1998) soulignent que le fumier apporté au sol, se décompose et libère plus facilement les éléments nutritifs que les résidus de cultures. De plus, la tendance à libérer les éléments nutritifs par le fumier semble bien coïncider avec la demande en nutriments de la plante. L'amélioration du niveau de fertilité du sol par l'utilisation du fumier, se traduit par la réduction de l'acidité et du taux de l'aluminium échangeable du fait de l'accroissement des réserves en éléments échangeables et la CEC, l'accumulation de la MO, et l'amélioration des propriétés biologiques (Fatondji, 2002 ; Mafongoya *et al.*, 2003 ; Maltas *et al.*, 2012 ; Gomgnimbou *et al.*, 2014). Bationo *et al.* (2004) ont montré l'influence de l'application du fumier sur le pH, l'azote total, la matière organique et le phosphore assimilable. Iyamuremeye et Dick (1996) ont rapporté que les sols ayant reçu du fumier ont un coefficient d'adsorption du phosphore faible, et que l'apport du fumier a un grand effet sur la disponibilité du phosphore. Après 45 ans d'expérimentation à Samaru au Nigeria, Agbenin et Goladi (1998) ont également montré que l'application du fumier permet d'améliorer la capacité d'échange cationique (CEC). En outre, l'évaluation de l'effet du fumier de porcins et de ferme sur les paramètres chimiques du sol à l'Ouest du Burkina Faso par Gomgnimbou *et al.* (2014), a permis de mettre en évidence l'accroissement de la teneur du sol en C, N, P, K, et la CEC.

Par ailleurs, des études ont montré que l'application du fumier permet d'améliorer les rendements des cultures (Fatondji, 2002 ; Bationo *et al.*, 2004 ; Achieng *et al.*, 2010 ;). Selon Achieng *et al.* (2010), le fumier a entraîné un accroissement du rendement en grain par rapport à la pratique paysanne de 108 % et 103 %, respectivement sur les Alfisols et les Ultisols au Kenya. L'utilisation du fumier dans les techniques de conservation de l'eau et du sol comme les Zaï, les diguettes antiérosives et les demi-lunes, permet d'améliorer les rendements. Fatondji (2002) a indiqué que la technique de Zaï utilisée en combinaison avec le fumier, a significativement augmenté le rendement en grain de mil. Zougmore *et al.* (2011)

ont rapporté que l'application de compost ou de fumier en combinaison avec les techniques de conservation de l'eau et du sol à la station de Saria au Burkina Faso, augmente le rendement en grain de mil de 142 %, comparé à un taux d'accroissement de 65 % dû à l'application de l'engrais minéral. Pourtant, bien que l'utilisation du fumier dans la zone soudano-sahélienne soit une partie intégrante de la restauration de la fertilité des sols et de l'amélioration du rendement des cultures, la disponibilité et parfois la qualité du fumier constituent une contrainte majeure (Nyathi *et al.*, 2003 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Kiba, 2012).

1.4.3. Phospho-compost

Le compostage des résidus de récolte constitue une alternative pour leur utilisation efficace en vue d'une amélioration de la productivité des sols au Sahel. Le traitement des phosphates naturels avec des matériaux organiques et/ou leur compostage, est une technique prometteuse pour augmenter la solubilité de ces types d'engrais et la disponibilité du phosphore pour les plantes (Zapata et Roy, 2004 ; Akande *et al.*, 2005 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Makinde, 2013 ; Sharif *et al.*, 2013 ; Ali *et al.*, 2014). Akandé *et al.* (2005) ont rapporté que l'efficacité des phosphates naturels de Sokoto et d'Ogun a été remarquablement améliorée par l'effet solubilisant de la fiente de la volaille, et que le rendement en grain du maïs (comparé à l'application de phosphates seuls) a été augmenté. Des taux d'accroissement de rendement du niébé ont également été observés.

Les produits compostés avec des phosphates naturels sont habituellement désignés sous le nom de phospho-composts, et leur préparation est basée sur des principes scientifiques. Pendant la décomposition des matériaux organiques, une activité microbienne intense se développe et se traduit par une production d'acides organiques et humiques (Zapata et Roy, 2004 ; Bonzi *et al.*, 2011). L'augmentation de la libération de phosphore par les phosphates naturels semble être une fonction de son acidification par les acides organiques de par leur capacité de chélation sur le calcium (Ca), le fer (Fe) et l'aluminium (Al). Le taux de solubilisation des phosphates naturels pendant le compostage, dépend de la qualité et de la quantité des matériaux organiques (Zapata et Roy, 2004 ; Akande *et al.*, 2005 ; Thuita *et al.*, 2005 ; Bonzi *et al.*, 2011). Bonzi *et al.* (2011) ont par ailleurs rapporté que leur solubilité peut être améliorée en incorporant 80 kg de phosphate par tonne de résidus organiques en début de compostage.

De nombreuses études ont montré l'effet positif de l'utilisation du phospho-compost sur l'augmentation des rendements des cultures (Akande *et al.*, 2005 ; Sharif *et al.*, 2013 ; Ali *et al.*, 2014). Selon Ali *et al.* (2014), tous les composts préparés avec différents matériaux organiques et appliqués avec du phosphate naturel ont significativement augmenté la matière sèche du trèfle par rapport au témoin, avec des accroissements de rendement de 23 à 82 %. Les mêmes auteurs ont observé que l'effet résiduel des composts a été déterminant sur l'augmentation significative de l'absorption de N et P par le maïs subséquent. Il a été rapporté par Sharif *et al.* (2013) et Ali *et al.* (2014), que les composts préparés à partir de différents matériaux organiques avec du phosphate naturel, sont économiques, respectueux de l'environnement, et ont un potentiel pour améliorer les rendements des cultures et l'absorption de N et P par la plante. Le phospho-compostage offre l'avantage d'employer des phosphates naturels inutilisables autrement, et d'éliminer des résidus organiques d'une manière saine pour l'environnement. Dans les situations où les engrais organiques ont déjà été utilisés ou sont une alternative viable aux engrais chimiques, le phospho-compostage est avantageux (Mugwira *et al.*, 2002). Par ailleurs, si le phospho-compost doit être appliqué principalement comme source de phosphore, alors les avantages doivent être pesés par rapport au coût de préparation et d'application (Zapata et Roy, 2004). En effet, la production du compost nécessite de la main d'œuvre et des substrats organiques en quantité et en qualité, qui ne sont pas toujours disponibles et/ou accessibles à la grande majorité des petits producteurs.

1.5. Fertilisation minérale et organique

Il a été suffisamment démontré que les engrais minéraux comme les amendements organiques permettent d'accroître les rendements des cultures. Cependant à long terme, chacun d'eux présente une certaine limite quant à l'optimisation des rendements des cultures pour faire face aux besoins de la population surtout en Afrique sub-saharienne. En cas d'utilisation pendant de longues années, les engrais minéraux ont tendance à acidifier le sol, à augmenter l'acidité d'échange, et à baisser la quantité de bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC). Avec une utilisation prolongée des engrais minéraux, ces inconvénients sont des facteurs capables de réduire les rendements des cultures, comme l'ont observé Agbenin et Goladi (1998), Bado (2002), Bationo *et al.* (2012) et Maltas *et al.* (2012). Quant aux amendements organiques, ils améliorent la teneur en MO, la CEC, la fourniture en éléments nutritifs et l'activité biologique (Mando *et al.*, 2005 ; Pallo *et al.*, 2006 ; Miao *et al.*,

2011; Maltas *et al.*, 2012), mais à eux seuls, ils ne peuvent pas soutenir une intensification durable de la production agricole (Vanlauwe *et al.*, 2006). De ce fait, la gestion intégrée de la fertilité du sol pour une production agricole durable, doit nécessairement passer par la combinaison des engrais minéraux et des amendements organiques comme l'ont montré des nombreuses études (Agbenin et Goladi, 1998 ; Bationo *et al.*, 2001 ; Bado, 2002 ; Mafongoya *et al.*, 2003 ; Bationo *et al.*, 2004 ; Achieng *et al.*, 2010 ; Vanlauwe *et al.*, 2010 ; Fening *et al.*, 2011 ; Miao *et al.*, 2011 ; Bationo *et al.*, 2012 ;). La combinaison organo-minérale joue également un rôle important sur les propriétés du sol en réduisant la diminution de la matière organique du sol, en améliorant la CEC et l'utilisation efficiente des éléments nutritifs (Agbenin et Goladi, 1998 ; Vanlauwe et Giller, 2006 ; Maltas *et al.*, 2012 ; Winterbottom *et al.* 2013). L'efficacité agronomique des éléments nutritifs peut être améliorée davantage en associant la combinaison engrais minéraux et matière organique, aux systèmes de culture à base de légumineuse.

1.6. Systèmes de cultures

1.6.1. Rotation légumineuse – céréale

L'intérêt de la recherche pour la rotation s'est beaucoup manifesté ces dernières années, et des résultats intéressants ont été obtenus (Subbarao *et al.*, 2000; Vanlauwe *et al.*, 2000 ; Bado, 2002 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2012 ; Omae *et al.*, 2014). Ces auteurs ont montré que la rotation légumineuses-céréales accroît significativement le rendement de la céréale subséquente. Bado (2002) a rapporté que les précédents légumineuses augmentaient l'azote minéral du sol de 13 à 40 %, et que le sorgho prélevait 2 à 3 fois plus d'azote, entraînant des augmentations de rendements de 60 à 300 % par rapport à la monoculture. L'amélioration de la nutrition azotée de la céréale serait responsable de l'augmentation du rendement due au précédent de la légumineuse. L'utilisation de l'azote a varié de 20 % en monoculture de mil à 28 % dans le système de rotation mil-niébé (Bationo *et al.*, 2002). Ces auteurs rapportent aussi que l'utilisation de l'azote du sol a augmenté de 39 kg N ha⁻¹ en monoculture, à 62 kg N ha⁻¹ dans la rotation mil-niébé. L'effet bénéfique observé peut être attribué à l'azote fixé par la légumineuse, au N économisé sous la culture de la légumineuse, et à la libération de N provenant de la décomposition des résidus de la légumineuse (Chalk, 1998 ; Bado, 2002). Mais l'apport de l'azote atmosphérique n'explique pas toujours les

rendements souvent élevés de la céréale subséquente (Bationo et Ntare, 2000). D'autres effets bénéfiques des légumineuses semblent intervenir dans l'accroissement des rendements (Bationo *et al.*, 2002, Nandwa *et al.*, 2011). Les autres avantages des légumineuses qui ont été évoqués sont l'amélioration des propriétés biologiques et physiques du sol, la solubilisation des composés phosphatés non disponibles par les exsudations racinaires des légumineuses, la conservation et la restauration de la matière organique, et le contrôle des maladies (Bationo *et al.*, 2002 ; Carsky *et al.*, 2002 ; Saidou, 2005 ; Saidou *et al.*, 2011).

Cependant, la rotation mil-niébé ne permet pas de maintenir le taux de matière organique du sol (Subbarao *et al.*, 2000 ; Bado, 2002). En outre, elle contribue à diminuer le pH, la capacité d'échange des cations, les taux de potassium, de calcium et de magnésium, par rapport à la jachère (Bagayoko *et al.*, 1998). L'adoption de la culture pure de niébé par les paysans Nigériens demeure encore très timide, et mérite un appui institutionnel pour la promouvoir. Une des principales contraintes à la production du niébé, est son exigence en main d'œuvre. A titre illustratif, les différentes opérations culturales demandent quelques 225 à 235 homme-jours pour la pratique traditionnelle de la culture pure de mil, alors que la culture pure du niébé demande 482 à 524 homme-jours. La récolte des graines de niébé à la main utilise 180 homme-jours, contre 35 homme-jours pour la même opération dans le cas de la culture pure du mil (Subbarao *et al.*, 2000). L'utilisation des pesticides ou de la lutte biologique est également indispensable pour la production de niébé en culture pure. Mais les coûts élevés de ces intrants font que les producteurs évitent ce système de culture.

1.6.2. Association céréale- légumineuse

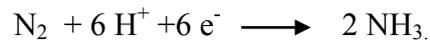
L'association de cultures, qui consiste à exploiter simultanément deux cultures ou plus sur le même champ, est une caractéristique courante de l'agriculture traditionnelle des zones tropicales (Bationo *et al.*, 2011 ; Odoendo *et al.*, 2011 ; Kiba, 2012). Elle couvre plus de 75 % des terres cultivées dans les zones Soudano-Sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest. La stabilité de la production en année pluvieuse ou pas, constitue son avantage majeur (Bationo *et al.*, 2003). Au Niger, il a été estimé que l'association des cultures est pratiquée sur 77,3 % des superficies emblavées (MDA/MRA, 2008). Le type d'association de culture le plus couramment rencontré au Niger est celui qui combine le mil ou le sorgho avec le niébé ou l'arachide (Reddy *et al.*, 1985).

Le profit tiré des cultures associées est spécifique au type de sol et est évalué principalement en termes d'humidité du sol et de fertilité disponible, en relation avec la fixation biologique de l'azote (Rusinamhodzi *et al.*, 2012). Des études ont mis en évidence le transfert de N de la fixation biologique de la légumineuse vers la céréale. Cependant, les quantités de N transférées sont faibles (Abaidoo et Kessel, 1989 ; Giller *et al.*, 1991 ; Chalk, 1996 ; Guillaume *et al.*, 2011). Ainsi, l'utilisation efficace des ressources du milieu, la minimisation des risques d'échec de production, l'amélioration de la fertilité du sol et sa protection, constituent les principales raisons pour lesquelles l'association des cultures est pratiquée. Rusinamhodzi *et al.* (2012) ont rapporté que ce système de culture est plus productif que la culture continue des spéculations correspondantes. Ces auteurs ont constaté que la culture intercalaire maïs-légumineuse a un potentiel de réduction du risque de l'échec, d'amélioration de la productivité et des revenus, et d'augmentation de la sécurité alimentaire dans les systèmes de production vulnérables. Ils ont suggéré que ce système de culture peut être une voie vers l'intensification écologique. D'autres études ont montré que la productivité dans ce système peut être améliorée en utilisant des variétés améliorées, des dates appropriées de semis, des densités de semis élevées, une fertilité améliorée des sols et des arrangements spatiaux appropriés (Olufajo et Singh, 2002; Woome *et al.*, 2004 ; Omae *et al.*, 2014). Il a été alors rapporté que les arrangements de deux rangées de céréales avec deux rangées de niébé, ou deux rangées de céréales avec quatre rangées de niébé, seraient mieux indiqués que la pratique traditionnelle d'une rangée de céréale avec une rangée de niébé, en améliorant les rendements et l'efficacité d'utilisation de la terre (Olufajo et Singh, 2002 ; Woome *et al.*, 2004 ; Ajeigbe *et al.*, 2010).

1.7. Fixation biologique de l'azote

L'azote gazeux (N₂) représente environ 80 % de l'atmosphère de la terre ; pourtant, les plantes et les animaux n'arrivent pas à obtenir tout l'azote dont ils ont besoin pour leur croissance. Cette situation découle du fait que la molécule N₂ est très stable chimiquement, donc inutilisable par la plupart des organismes biologiques (Fisher et Newton, 2002). Toutefois, un nombre réduit de bactéries vivant librement ou en symbiose avec les plantes, sont capables de réduire l'azote moléculaire de l'atmosphère, le rendant ainsi assimilable (Bado, 2002 ; Claudine *et al.*, 2009). La réduction de l'azote moléculaire en azote

ammoniacale se fait selon la réaction suivante sous l'action d'une enzyme, la nitrogénase (Fisher et Newton, 2002) :



Au cours de cette fixation de l'azote, la plante fournit aux bactéries l'énergie dont elles ont besoin pour leur croissance, et les bactéries fournissent l'azote fixé à la plante. La plante et les bactéries tirent réciproquement profit de cette relation, connue sous le nom de symbiose. Ainsi, la fixation de l'azote atmosphérique (N_2) procède par plusieurs mécanismes dont le plus important et le plus connu est la fixation biologique par les micro-organismes libres, ou vivants en symbiose avec certaines plantes comme les légumineuses. Lors de la fixation symbiotique, les racines des légumineuses peuvent être colonisées par les bactéries de la famille des Rhizobiaceae en général et celles du genre *Rhizobium* en particulier, entraînant la formation de nodules appelés nodosités (Bado, 2002).

Par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique pour leur croissance, les légumineuses ayant une fixation biologique de l'azote efficace peuvent être cultivées sans apport de fertilisant azoté. Elles peuvent ainsi jouer un rôle particulièrement important dans les pays en développement, à cause du coût élevé et /ou de la disponibilité limitée des engrais azotés dans ces régions (AIEA, 2001). Sans apport de fertilisant azoté, les légumineuses fixatrices d'azote utilisent deux sources d'azote : l'azote du sol et de l'atmosphère. Quand on applique l'engrais azoté, elles utilisent trois sources d'azote : le sol, l'engrais et l'atmosphère. Il est aussi possible de quantifier l'azote provenant de chaque source (AIEA, 2001). Plusieurs méthodes permettent de quantifier l'azote atmosphérique provenant de la fixation biologique. Les méthodes les plus souvent utilisées sont : la méthode par différence d'azote total, l'observation des nodules, la valeur de remplacement en fertilisant azoté (VRFA), la réduction de l'acétylène, l'abondance naturelle en ^{15}N , l'atmosphère enrichie en $^{15}\text{N}_2$, la dilution isotopique, et la méthode de la valeur 'A' (AIEA, 1990 ; Hardarson *et al.*, 1991 ; Hardarson et Danso, 1993 ; AIEA, 2001 ; Fisher et Newton, 2002 ; People *et al.*, 2002). La méthode de la différence d'azote est la plus simple et la moins coûteuse ; les méthodes isotopiques utilisant l'isotope ^{15}N sont plus chères, mais plus précises (Hardarson et Danso, 1993 ; Peoples *et al.*, 2002). Ainsi, chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. Le choix d'une méthode dépend des objectifs du travail, des ressources disponibles, des conditions expérimentales et du niveau de précision recherchée.

1.7.1. Utilisation des isotopes de N pour mesurer la fixation biologique de l'azote

1.7.1.1. Utilisation de fertilisants enrichis ou de substrats

La méthode de dilution isotopique de ^{15}N et d'autres méthodes basées sur le même principe, implique la culture simultanée de plantes fixatrices et plantes non fixatrices de référence, sur un sol fertilisé avec un fertilisant organique ou inorganique marqué au ^{15}N . Elle se base sur la dilution différentielle dans la plante de l'engrais marqué au ^{15}N par l'azote du sol et celui fixé par la plante (Friend et Broeschart, 1957 ; Friend et Middelboe, 1997). Elle donne une mesure intégrée de la quantité d'azote fixé accumulée par la culture au cours de son cycle végétatif. Le prélèvement de fertilisant enrichi en ^{15}N préalablement ajouté au sol, résulte dans un rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ plus grand que l'abondance naturel 0,3663 % dans la plante, reflétant ainsi le prélèvement de l'engrais marqué ^{15}N appliqué. En revanche, une diminution de l'excès isotopique en ^{15}N % de l'azote du fertilisant dans la plante est une indication de la part de N prélevée par la plante d'une source de N non marquée (de l'air par exemple). La détermination de l'excès isotopique en ^{15}N ou du pourcentage de N dérivé du fertilisant (Ndff % : Nitrogen derived from fertilizer), est nécessaire avant que la fixation biologique de N puisse être calculée.

1.7.1.2. Méthode de dilution isotopique au ^{15}N (DI)

Dans chaque plante, le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de la matière végétale est abaissé par le N absorbé provenant du sol non marqué. De la même façon, en présence de N_2 et à cause de la fixation symbiotique du N_2 atmosphérique par la plante fixatrice, le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de la plante fixatrice est diminué. La détermination de l'excès isotopique en ^{15}N dans laquelle ce rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de la plante fixatrice est diminué relativement à la plante non fixatrice, peut être utilisée pour estimer la quantité de N_2 fixée au champ.

1.7.2. Recouvrement de l'azote

L'azote est un élément nutritif essentiel pour la production agricole. Il est le plus mobile et celui qui s'épuise le plus facilement du sol. Ainsi, la gestion de l'engrais azoté constitue une grande préoccupation dans les sols sableux du sahel. Par sa grande mobilité,

quand il n'est pas utilisé par la plante, il peut être perdu par lixiviation et par émission de gaz, principalement par volatilisation ou par dénitrification (Zapata, 2008). Ainsi, son recouvrement est faible au Sahel, particulièrement à cause des pertes importantes par volatilisation (Christianson *et al.*, 1990 ; Bonzi, 2002 ; Guillaume *et al.*, 2011). Dans une étude sur le potentiel en azote du niébé dans le sous-sol, Guillaume *et al.* (2011) ont trouvé que la moitié de N total du niébé en maturité associé avec le mil, était sous le sol et dépassait 20 kg N ha^{-1} ; seulement 15 % de cette quantité a été recouverte par les racines pendant que les 85 % étaient dans le pool de la rhizodéposition. Or, l'azote non utilisé peut faire l'objet d'une déperdition. Smil (1999) rapporte que les plus faibles valeurs de recouvrement de l'azote ont été trouvées en Afrique à cause des facteurs limitants de croissance comme le manque d'eau, l'acidité du sol et la déficience en éléments nutritifs. Le coefficient d'utilisation apparent de l'azote (CAU) déterminé à partir de la méthode de différence d'azote, et le coefficient réel de l'utilisation de l'azote (CRU) déterminé à partir des méthodes isotopiques de ^{15}N , sont des paramètres qui permettent d'évaluer la quantité d'azote provenant de l'engrais azoté et absorbée par la plante. Le CRU représente cependant l'évaluation la plus précise. La combinaison des engrais et de la matière organique associée aux systèmes de cultures avec les légumineuses, influence l'utilisation de l'azote par les plantes. La fixation biologique de l'azote atmosphérique, les engrais minéraux azotés et les engrais organiques, sont les principales sources d'azote pour les plantes dans les sols sub-sahariens (Giller, 2001). Ismaili et Weaver (1986) ont rapporté qu'il existe des preuves qui suggèrent que le taux de minéralisation de l'azote organique dans le sol peut être plus important en présence de légumineuses fixatrices de N_2 . Guillaume *et al.* (2011) ont montré que la rhizodéposition du niébé est potentiellement un important apport de N dans les systèmes de cultures de la région soudano-sahélienne. La contribution en azote des légumineuses doit être plus élevée dans les rotations que dans les cultures associées. Cette contribution peut être évaluée en déterminant l'azote total absorbé, l'azote minéral et l'utilisation de l'engrais par les céréales en association ou en rotation avec les légumineuses.

1.8. Conclusion partielle

La production agricole au Niger est très faible et mérite une intensification durable pour répondre aux besoins d'une population forte et de plus en plus croissante. Les facteurs inhibiteurs sont hélas nombreux et multifformes, y compris la mauvaise gestion de la fertilité

des sols. Les sols sont naturellement pauvres et se dégradent progressivement du fait de pratiques culturales inadéquates. La recherche des innovations technologiques est nécessaire en vue d'accroître la productivité. Le développement de nouvelles technologies dans le domaine de la GIFS peut être une voie vers l'accroissement durable de la productivité. L'utilisation efficiente des ressources naturelles locales telles que les phosphates naturels et la matière organique est une grande opportunité. Elle a entre autres, l'avantage de résoudre ou tout au moins de réduire le problème d'accessibilité des petits producteurs aux engrais minéraux conventionnels qui sont chers et pas toujours disponibles partout. La fixation biologique de l'azote par les légumineuses dans les systèmes de culture par exemple, est une bonne alternative. Elle permet d'améliorer davantage l'efficacité de l'effet combiné de la matière organique et des engrais minéraux et par conséquent d'augmenter les rendements des cultures.

Chapitre II. Sites d'études

Les travaux ont été conduits au Niger, pays situé en Afrique de l'Ouest (Figure 4), dans deux sites d'étude : les sites de Sadoré et de Kalapaté.

2.1. Site de Sadoré

Le site se trouve dans la station agronomique du Centre sahélien de l'Institut International de Recherche sur les Cultures dans les Tropiques Semi-arides (ICRISAT), situé dans la localité de Sadoré. Ce centre est situé dans la région Ouest du Niger (Latitude : 13°15'N ; longitude 2°18' E ; altitude 240 m) et est situé à 45 km au sud de Niamey la capitale, dans le département de Say (Figure 5).

Sadoré se trouve dans la zone sahélo-soudanienne qui se caractérise par une pluviosité comprise entre 400 et 600 mm avec une valeur moyenne de 505 mm (2000 à 2009) (Figure 6). La saison des pluies s'étale de Mai à Octobre, avec des variations de précipitations dans le temps. La pluviosité a varié de 481 mm en 35 jours en 2008, à 516 mm en 41 jours en 2009 (Figure 7). Le sol de Sadoré appartient à la classe des sols ferrugineux tropicaux lessivés. Il est très sableux (avec une faible teneur en argile et en limon), fortement acide et pauvre en phosphore. Il présente une teneur en carbone organique faible, expliquant ainsi la très faible capacité d'échange cationique (CEC). Le tableau I présente les caractéristiques physiques et chimiques du sol de Sadoré.

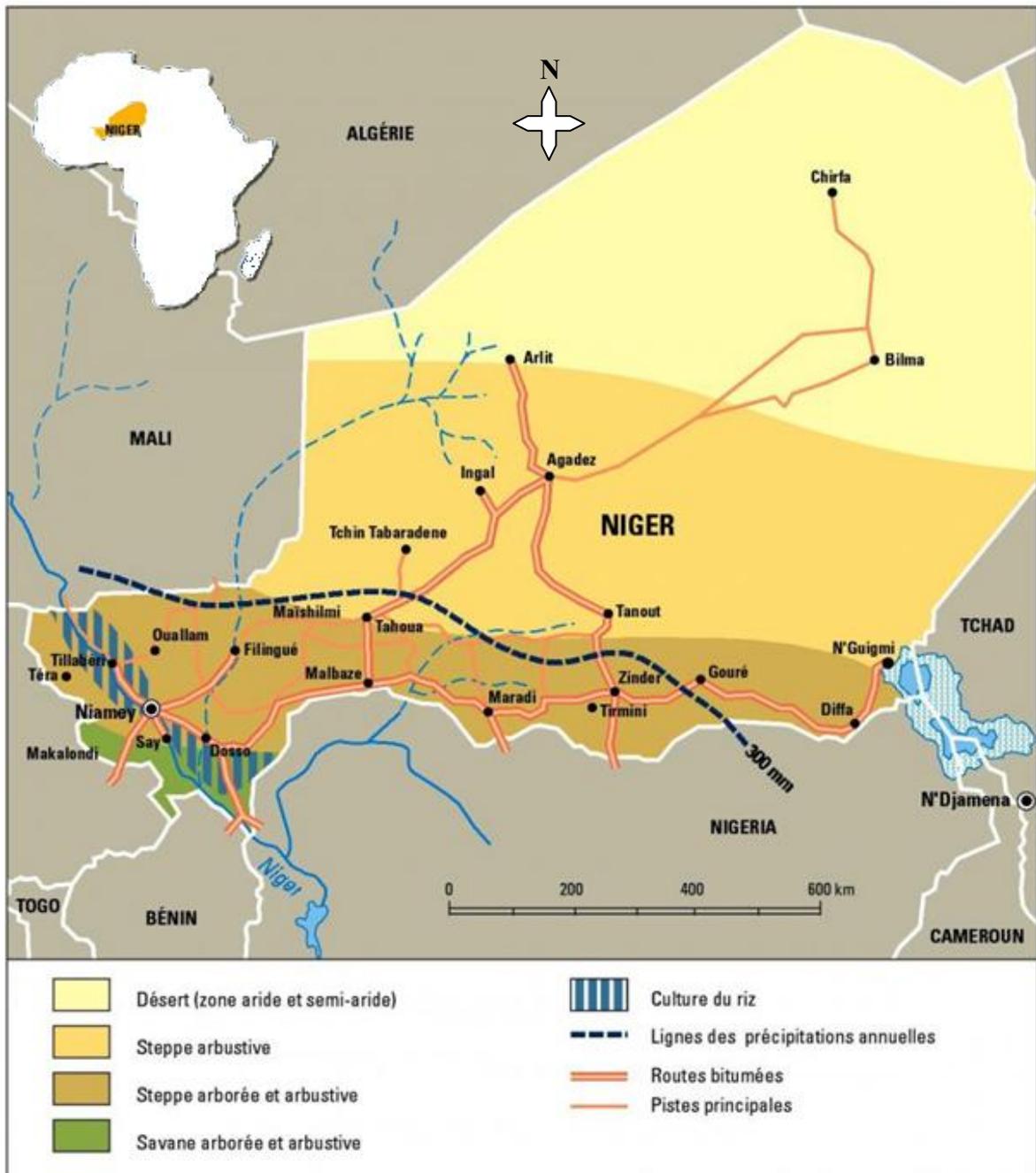


Figure 4 : Carte d'Afrique situant le Niger (Source Philippe Rekacewicz 2011).
<http://blog.mondediplo.net/2011-01-07-Au-Niger-le-cycle-des-crisis-alimentaires>

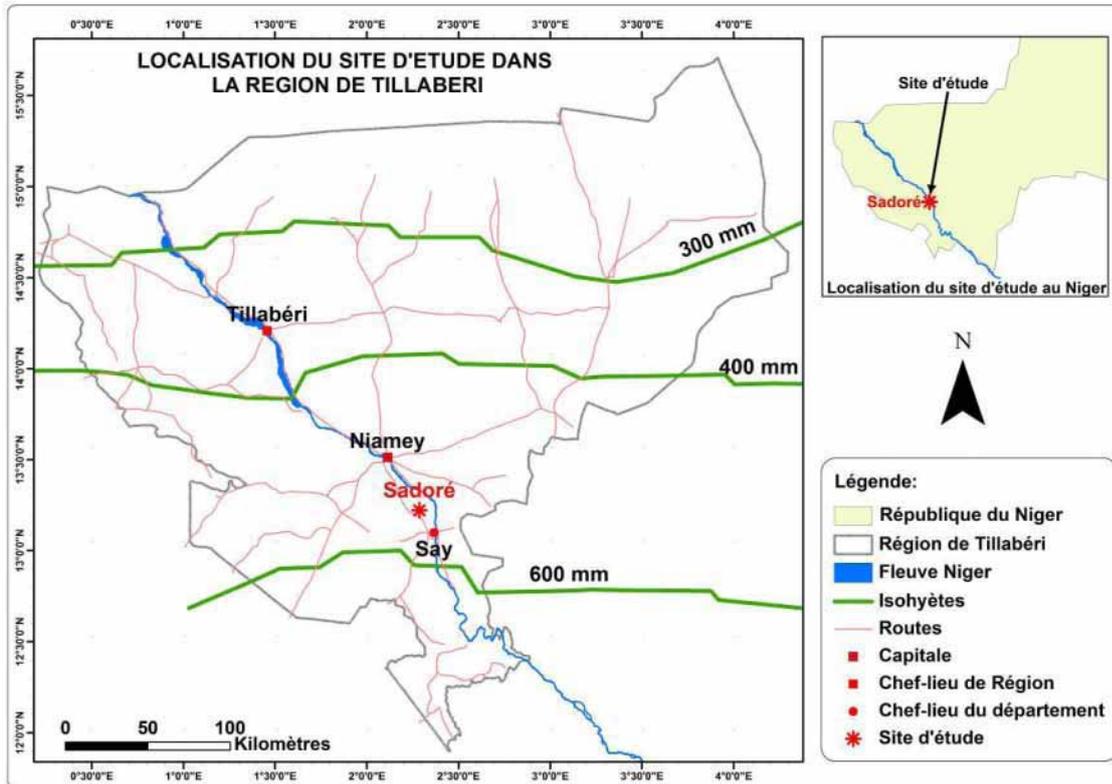


Figure 5 : Localisation du site de Sadoré (Source : Service de cartographie ICRISAT 2010).

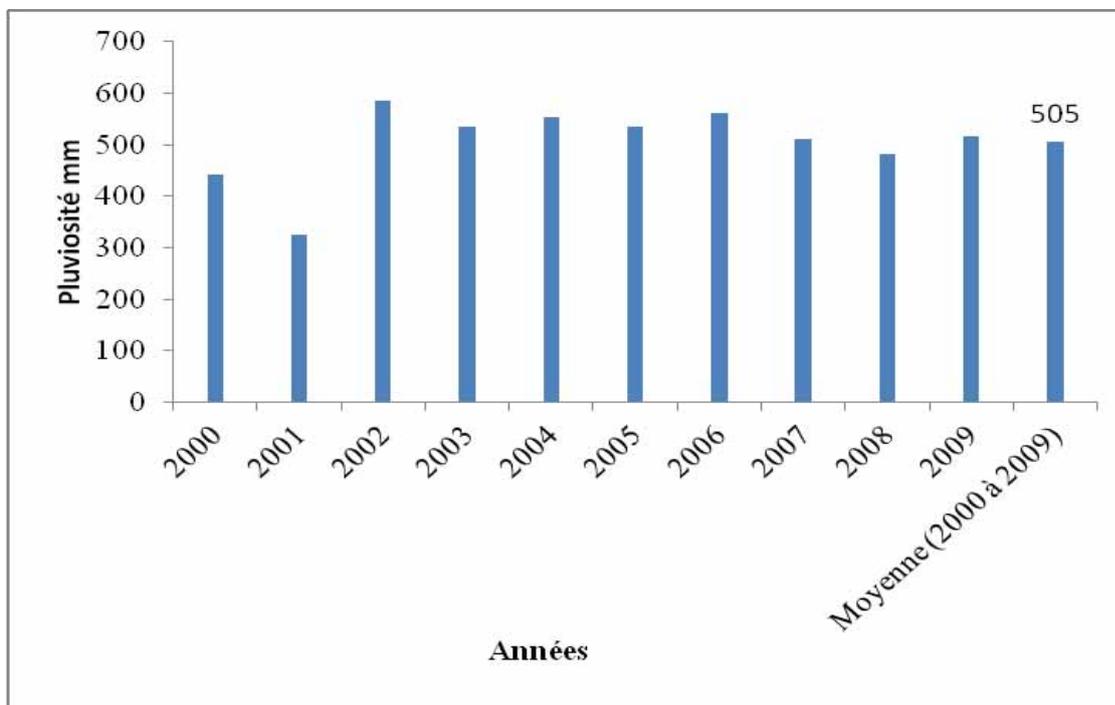


Figure 6 : Pluviosité de Sadoré de 2000 à 2009 (Source : ICRISAT Sadoré, 2010).

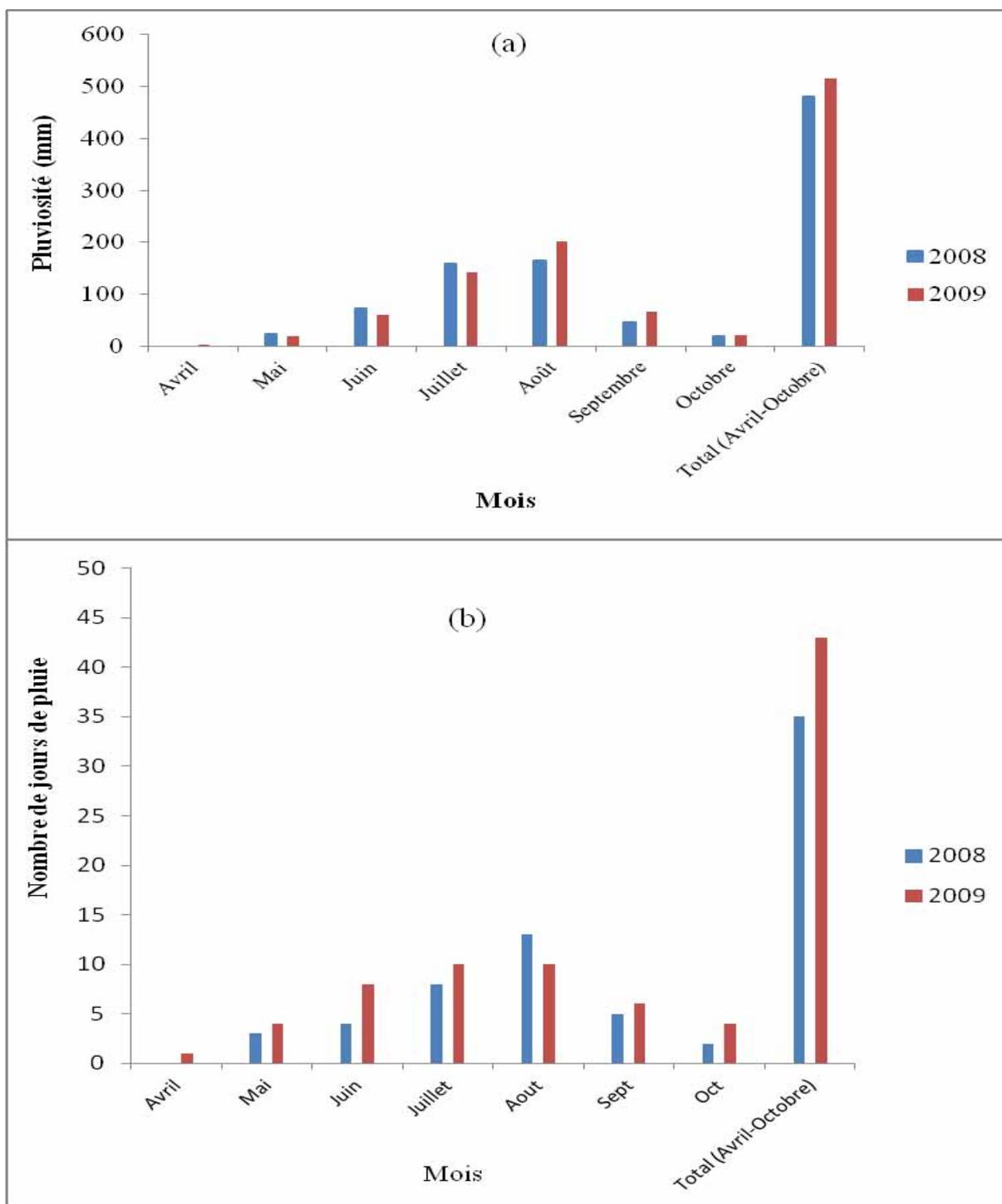


Figure 7 : Pluviosité (a) et nombre de jours de pluie (b) à Sadoré (Source : ICRISAT Sadoré 2010).

Tableau I : Caractéristiques physiques et chimiques des sols de Sadoré et Kalapaté

Caractéristiques	Sadoré	Kalapaté
pH-H ₂ O	5,3	5,4
PH-KCl	4,5	4,4
P-Bray (mg kg ⁻¹)	2,8	6,9
Total-P (mg kg ⁻¹)	61	368
C.Org (mg kg ⁻¹)	2000	1200
MO (mg kg ⁻¹)	3400	2100
Total-N (mg kg ⁻¹)	200	110
C/N	10	10,9
CEC-Ag (cmol ⁺ kg ⁻¹)	1,1	1,3
Sable (g kg ⁻¹)	938	936
Limon (g kg ⁻¹)	33	27
Argile (g kg ⁻¹)	29	37

Source : Données ICRISAT et INRAN (non publiées, 1998)

Sadoré est situé dans la zone de brousse tigrée qui constitue l'essentiel des formations forestières de la partie Ouest de la République du Niger. Sa végétation est dominée par des Combretaceae (*Combretum micranthum* G. Don., *Guiera senegalensis* Lam et *Combretum nigricans* Lepr. ex Guill. et Perr.) (Morou, 2010). On rencontre également des espèces telles que *Combretum glutinosum* Perr. ex DC., *Balanites aegyptiaca* (L.) Del et *Piliostigma reticulatum* (DC) Hochst dans les parcs agroforestiers (Renard *et al.*, 1993). La strate herbacée est constituée particulièrement de *Cenchrus biflorus* Roxb., *Andropogon gayanus* Kunth, *Cassia mimosoïdes* (L) et *Merremia pinnata* Hochst ex Choisy Mollier.

2.2. Site de Kalapaté

Le site de Kalapaté est un Point d'Appui de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAN), situé entre 13°20' N de Latitude et 2°93'E de Longitude. Kalapaté est un village situé à 115 km de Niamey la capitale. Il se trouve dans la macro-zone de Dallol Bosso, dans le département de Birni N'Gaouré (Boboye) de la région de Dosso (Figure 8). La saison des pluies s'étale de Juin à Octobre, avec des variations de précipitations, y compris au cours des années de l'expérimentation. La pluviosité a varié de 327 mm en 28 jours en 2011, à 910 mm en 22 jours en 2012, et à 521 mm en 27 jours en 2013. La valeur de moyenne de la

pluviosité de 2004 à 2013 était de 450 mm (Figure 9). En 2012, la pluviosité a été la plus élevée (910 mm) avec le moins de nombre de jours de pluie (22). En effet, il s'est agi des pluies très abondantes tombées en un nombre de jours limité, provoquant des inondations, un mauvais développement végétatif des plantes et de pertes de récolte. Ainsi, nous n'avons pas tenu compte des données de 2012 dans l'interprétation des données. Quant à l'année 2011, elle a été la moins pluvieuse (327 mm, en deçà de la valeur moyenne des dix dernières années qui est de 450 mm) avec de longues séquences sèches. Cette situation a beaucoup affecté le développement de la culture de niébé, qui a été semé un peu tard après le semis du mil ; les données du niébé de 2011 n'ont pas aussi fait objet d'interprétation. Donc, seuls les résultats de 2013 du niébé ont été présentés.

Le sol de Kalapaté appartient aux sols ferrallitiques faiblement désaturés de la classification française, correspondant à la classe des lixisols de la classification FAO (IUSS, 2014). Ses caractéristiques physiques et chimiques ont été données dans le Tableau I. C'est un sol fortement acide et pauvre en phosphore comme celui de Sadoré. Sa teneur en carbone organique est faible (plus faible que celle de Sadoré), expliquant la très faible capacité d'échange cationique (CEC). A l'instar du sol de Sadoré, il est très sableux avec un faible taux d'argile et de limon.

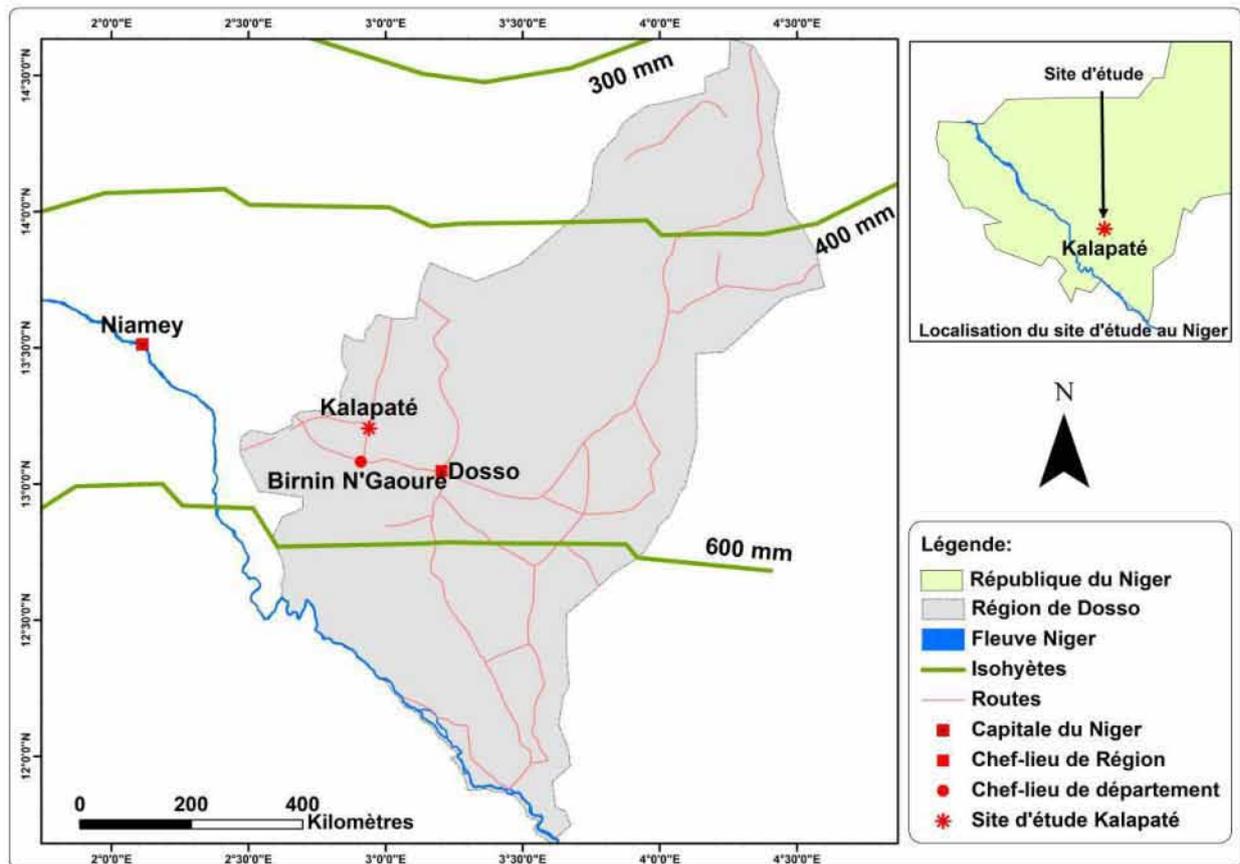


Figure 8 : localisation du site de Kalapaté (Source : Service de cartographie INRAN, 2014).

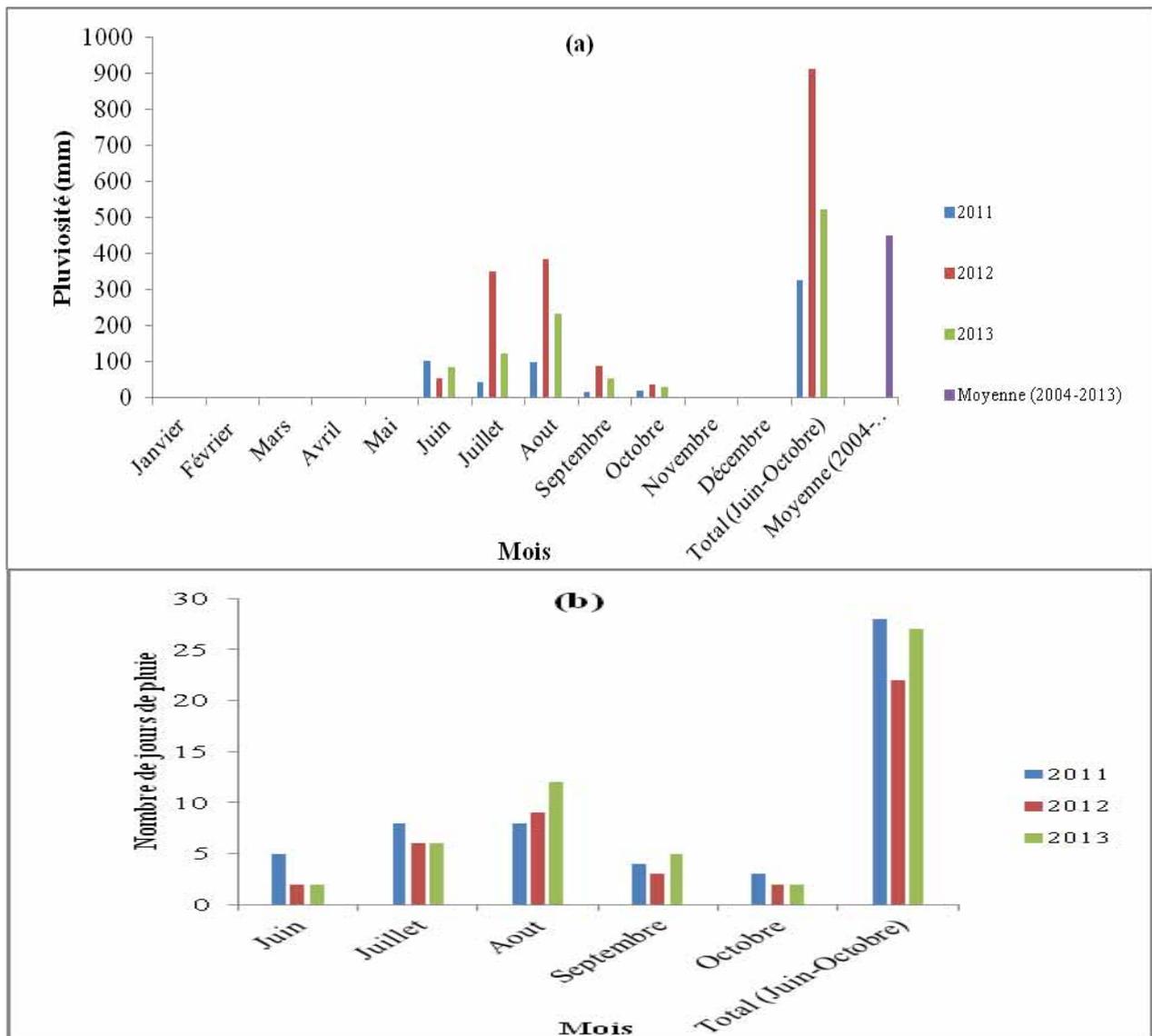


Figure 9 : Pluviosité (a) et nombre de jours de pluie (b) à Kalapaté (Source INRAN, 2013).

Dans le département de Birni N’Gaouré auquel appartient Kalapaté, les formations végétales remarquables sont les parcs agroforestiers et les brousses tigrées selon Dan Guimbo (2011), elles sont occupées principalement par :

- les Combretaceae (le groupe dominant) : *Combretum micranthum* G. Don. , *Combretum collinum* Sp., *Combretum nigricans* Lepr. Ex Guill. et Perr, *Combretum glutinosum* Perr. Ex DC et *Guiera senegalensis*.F. Gmel. ;
- les Mimosaceae : *Acacia ataxacantha* DC., *Acacia erythrocalyx* Brenan. , *Acacia macrostachya* Reichenb. ex Benth. et *Albizzia chevalieri* Harms ;
- les Anacardiaceae : *Lannea acida*, *Lannea microcarpa* Engl. Et K. Krause et *Sclerocarya birrea* Sp. ;
- les Bombacaceae : *Bombax costatum* Pellgr. Et Vuillet et *Adansonia digitata* L..

On distingue principalement des parcs à *Faidherbia albida* (Delile) A.Chev., à *Neocarya macrophylla* (Sabine) Prance à *Vitellaria paradoxa* Gaertn. F. et à *Borassus aethiopicum* Mart. La strate herbacée est constituée des espèces suivantes : *Zornia glochidiata* Reich. Ex DC., *Tripogon minimus* (Rich.) Hochst. Ex Steud., *Microchloa indica*. (L. f.) P. Beauv.

2.3. Sols

Au Niger, les sols sont classés dans six grands groupes: les sols minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols subarides, les sols ferrugineux tropicaux, les sols hydromorphes et les vertisols (Bankoula *et al.*, 1998 ; FAO, 2002). Ils sont décrits comme suit par Bankoula *et al.* (1998) :

- les sols minéraux bruts : ils couvrent plus de la moitié du territoire national, et sont situés en majorité dans la partie nord et nord-est du pays. Ces sols ne sont pas propices à l'agriculture et à l'élevage. Mais les sols d'apport sur les alluvions d'oued, sont cultivables localement grâce à l'irrigation ;
- les sols peu évolués : on distingue les sols d'érosion peu évolués dans l'extrême Nord et à l'Ouest, et les sols d'apport peu évolués, cultivés localement ;
- les sols subarides : ils couvrent une grande partie du territoire national. Ce sont des sols assez profonds, avec de la matière organique assez bien répartie sur l'ensemble du profil et qui diminue avec la profondeur. Leur fertilité minérale est très limitée, et ils sont très sensibles à l'érosion éolienne. Du fait de leur position géographique qui les place à la limite de la zone agricole, ils constituent des terres marginales ;
- les sols ferrugineux tropicaux : situés dans la partie méridionale du pays à pluviosité plus abondante et plus régulière, ce sont des sols profonds et évolués avec une matière organique qui subit une décomposition plus rapide. Ils se caractérisent par la présence d'oxydes de fer de couleur rougeâtre, une teneur très faible en matière organique et autres éléments nutritifs, et une forte teneur en sable. Du fait de la texture très sableuse, ils sont faciles à travailler et conviennent bien aux cultures peu exigeantes comme le mil et le sorgho. Ils sont très sensibles à l'érosion éolienne et hydrique. Au niveau des zones du fleuve Niger et dans la vallée des Dallols (Bosso et Maouri), les sols ferrugineux tropicaux reposent sur des terrasses entraînant une certaine hydromorphie et une halomorphie qui apparaît sur les alluvions récentes ;

- les sols hydromorphes : ils se situent surtout le long des cours d'eau fonctionnels, dans les vallées fossiles et sur les dépôts. Contrairement aux autres sols, ils présentent pour la plupart une texture argileuse. Par endroit, on trouve des sols à texture sableuse, et dans certains cas, on note la présence des sols alcalins ou salins, présentant des risques majeurs d'alcalinisation et de salinisation ;
- les vertisols : ils sont très peu répandus sur le territoire national. On les trouve du côté du Lac Tchad, et sur les sédiments argileux du Damérgou. Ce sont des sols très riches en éléments nutritifs, mais souvent difficiles à travailler compte tenu de leur texture très argileuse.

DEUXIEME PARTIE : CONDUITE DES ETUDES

Chapitre III. Effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au sahel¹

3.1. Introduction

Dans les zones semi-arides de l’Afrique de l’Ouest, les faibles rendements des cultures sont souvent expliqués par les conditions pluviométriques défavorables, la très pauvre fertilité des sols et la faible utilisation des engrais (Winterbottom et al., 2013). Du fait de leurs coûts élevés et de la faible disponibilité en milieu rural, les engrais sont très peu utilisés. Les pays d’Afrique au sud du Sahara sont ceux qui ont le plus faible taux d’utilisation dans le monde (Autfray *et al.*, 2012 ; Bationo *et al.*, 2012). Le Niger par exemple, n’utilise que seulement environ 4 kg ha⁻¹ contre une moyenne mondiale de 80 kg ha⁻¹ (Pandey *et al.*, 2001).

Pour une gestion durable de la fertilité des sols, il est nécessaire de combiner les engrais minéraux, la fumure organique et les systèmes de culture. Les fumures organiques présentent des effets très bénéfiques sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol (Bonzi *et al.*, 2004 ; Lompo *et al.*, 2006 ; Vanlauwe et Giller, 2006). Dans les zones sahéliennes de l’Afrique de l’Ouest, les fumures organiques les plus utilisées sont les résidus de culture et le fumier de ferme. Leur application permet d’améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Bonzi *et al.*, 2004 ; Ouédraogo *et al.*, 2004 ; Bationo *et al.*, 2012 ; Matlas *et al.*, 2012). Par ailleurs, par leur capacité à fixer l’azote atmosphérique grâce au processus de la fixation symbiotique, les légumineuses peuvent améliorer le bilan de l’azote dans les systèmes de culture et augmenter le rendement des céréales subséquentes (Subbarao *et al.*, 2000 ; Bado, 2002 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2006 ; Guillaume *et al.*, 2011 ; Bado *et al.*, 2012). Mais peu de travaux ont été effectués sur les rôles des légumineuses sur la fertilité du sol au Niger, la plupart des études s’étant très souvent limitées à montrer les effets bénéfiques des systèmes de culture à base des légumineuses sur les rendements des cultures. Peu de données existent sur la contribution en azote des légumineuses dans les systèmes de cultures, et leurs impacts en présence de fumures organiques sur la nutrition azotée. Ces données sont pourtant très utiles pour développer des

¹ Ce chapitre a été publié comme suit : **Hamidou Z.**, Mahamane S., Nacro H.B., Bado B.V., Lompo F.& Bationo A., 2014. Effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au sahel. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **8**(4): 1620-1632

technologies améliorées de gestion durable de fertilité des sols, permettant d'améliorer la productivité des systèmes traditionnels. L'azote fixé, et les contributions en azote des légumineuses et des fumures peuvent en effet être mesurés par les méthodes isotopiques utilisant l'isotope ^{15}N (AIEA, 2001 ; Bado, 2002 ; Peoples *et al.*, 2002)

Cette étude a été conduite afin (i) d'évaluer la contribution du niébé et des fumures sur la nutrition azotée du mil ; (ii) de déterminer l'impact de la fixation symbiotique de l'azote sur la fertilité du sol ; et (iii) d'identifier les stratégies de gestion durable permettant d'améliorer les rendements des cultures et la fertilité des sols. L'hypothèse qui la sous-tend est qu'une gestion intégrée des fumures minérales et organiques, associée au potentiel de fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses, permet d'améliorer la nutrition azotée et les rendements de la céréale et la fertilité du sol.

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Site de l'étude

Les expérimentations agronomiques ont été conduites à la station de recherche agronomique du Centre Sahélien de Sadoré de l'Institut International de Recherche sur les Cultures dans les Tropiques Semi-Arides (ICRISAT). Les caractéristiques du site ont été décrites au chapitre 2. Le matériel végétal est composé du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) variété Locale Sadoré et du niébé, variété TN5-78 (caractéristiques en annexe 9)

3.2.2. Dispositif expérimental

Les expérimentations ont été réalisées sur un essai de longue durée installé depuis 1994, pour suivre dans un premier temps « l'Interaction matière organique-engrais minéraux sur la production du mil ». Les systèmes de culture ont été introduits par la suite en 1997. Le dispositif expérimental est alors un split-plot en trois répétitions, avec 27 parcelles principales (10 m x 20 m) subdivisée chacune en 4 parcelles secondaires (5 m x 10 m) correspondant au système de culture (Figure 10). Les parcelles principales correspondent à la combinaison de 3 doses de résidus de récolte, 3 doses d'engrais, et 3 doses de fumier, soit 27 parcelles principales de 200 m² subdivisée chacune en 4 parcelles secondaires de 50 m² qui

représentent les systèmes de cultures (mil en continu, mil en rotation avec niébé, niébé en rotation avec mil et association mil-niébé). Il en résulte ainsi 108 parcelles secondaires (27x4) en 3 répétitions, donc au total 324 parcelles secondaires.

L'étude a été conduite en 2008 et 2009 avec application de l'engrais azoté marqué en ^{15}N .

Dispositif de l'essai intitulés « Effets de Résidus/Engrais/Fumier sur les cultures du mil et du niébé » Terrain 8A1 :81 parcelles principales*200m=1,62ha

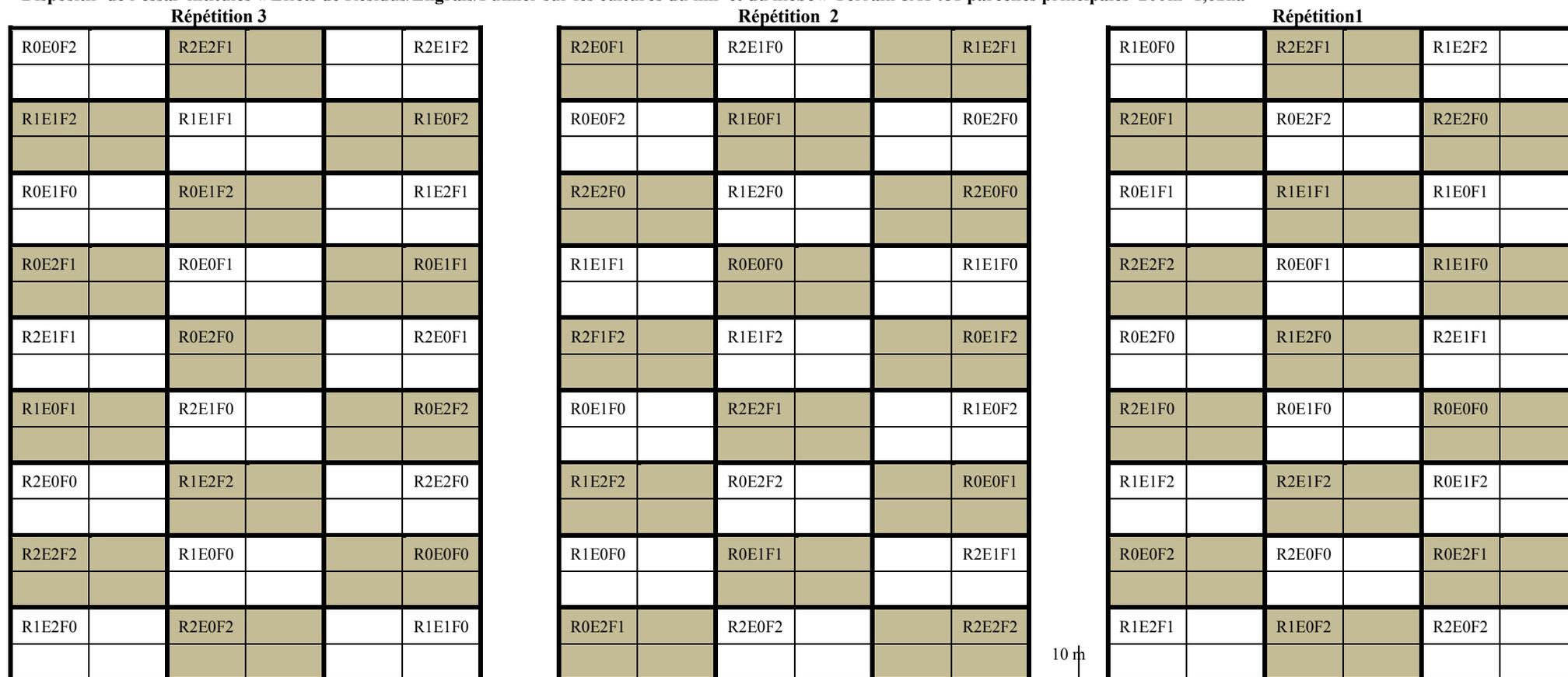


Figure 10 : Dispositif expérimental du site de Sadoré (81 parcelles de 200 m² *4 = 324 parcelles de 50 m²).

R0: 300 kg ha⁻¹ de résidus de paille de mil ; **R1:** 900 kg ha⁻¹ de résidus de paille de mil ; **R2:** 2700 kg ha⁻¹ de résidus de paille de mil ; **E0:** 0 kg ha⁻¹ de N et P ; **E1:** 15 kg ha⁻¹ de N et 4,4 kg ha⁻¹ de P ; **E2:** 45 kg ha⁻¹ de N et 13,2 kg ha⁻¹ de P ; **F0:** 300 kg ha⁻¹ de fumier ; **F1:** 900 kg ha⁻¹ de fumier ; **F2:** 2700 kg ha⁻¹ de fumier.

3.2.3. Traitements

Les traitements suivants ont été appliqués chaque année :

- Résidus de paille de mil aux doses suivantes :
 - 300 kg ha⁻¹ : R0 ; 1^{ère} dose
 - 900 kg ha⁻¹ : R1 ; 2^{ème} dose
 - 2700 kg ha⁻¹ : R2 ; 3^{ème} dose
- Engrais minéraux aux doses suivantes :
 - 0 kg ha⁻¹ de N et P (E0) ; 1^{ère} dose
 - 15 kg ha⁻¹ de N et 4,4 kg ha⁻¹ de P (E1) ; 2^{ème} dose
 - 45 kg ha⁻¹ de N et 13,2 kg ha⁻¹ de P (E2). 3^{ème} dose
- Fumier aux doses suivantes :
 - 300 kg ha⁻¹ : F0 ; 1^{ère} dose
 - 900 kg ha⁻¹ : F1 ; 2^{ème} dose
 - 2700 kg ha⁻¹ : F2; 3^{ème} dose

Le système de cultures utilisé est:

- Mil en culture pure ;
- Mil en rotation avec le Niébé ;
- Association Mil – Niébé ;
- Niébé en rotation avec le Mil.

3.2.4. Evaluation de la contribution des fumures organo-minérales et du niébé dans la nutrition azotée du mil

La contribution des fumures organo-minérales et du niébé dans la nutrition azotée du mil a été évaluée en appliquant l'urée marquée ¹⁵N sur les traitements suivants:

- R0E2F0 : 300 kg ha⁻¹ de paille de mil + 45 N et 13,2 P + 300 kg ha⁻¹ de fumier ;
- R1E2F0 : 900 kg ha⁻¹ de paille de mil + 45 N et 13,2 P + 300 kg ha⁻¹ de fumier ;
- R2E2F0 : 2700 kg ha⁻¹ de paille de mil + 45 N et 13,2 P + 300 kg ha⁻¹ de fumier ;
- R0E2F1 : 300 kg ha⁻¹ de paille de mil + 45 N et 13,2 P + 900 kg ha⁻¹ de fumier ;
- R0E2F2 : 300 kg ha⁻¹ de paille de mil + 45 N et 13,2 P + 2700 kg ha⁻¹ de fumier.

L'engrais phosphaté, le Super Simple Phosphate (18 % P₂O₅), les résidus de paille de mil et le fumier ont été apportés à la volée, puis incorporés avant le semis. Le mil (*Pennisetum*

glaucum (L.) R.Br.) variété Local Sadoré), a été semé à la densité de 1m x1m, soit 10000 poquets à l'hectare. Le Niébé, variété TN5-78 (caractéristiques en annexe 10), a été semé en culture pure à la densité de 40 0000 plants ha⁻¹ soit 0,50 m x 0,50 m ; en association, sa densité est 25 000 plants ha⁻¹ avec un écartement de 0,80 m x 0,50 m. Le mil a été semé en association à la densité de 6667 plants ha⁻¹ pour un écartement de 1,5 m x 1 m. L'urée marquée ¹⁵N à 10 % d'excès atomique au taux de 22,5 N kg ha⁻¹, a été apportée lors du premier sarclage, 21 jours après le semis. L'engrais marqué a été appliqué sous forme de solution sur 4 poquets des micros – parcelles qui sont délimitées par des tôles. Les poquets centraux ont été récoltés à la maturité physiologique. Des tôles de 40 cm de large sont placées sur une ligne du milieu, et enfoncés dans le sol à 15 cm de profondeur. La partie aérienne de la plante a été récoltée. Les échantillons ont été séchés d'abord à l'air pendant 8 jours et à l'étuve à 60 °C pendant 72 heures, puis pesés et broyés pour le dosage de l'azote total et des excès atomiques de ¹⁵N.

3.2.5. Analyse isotopique

L'analyse isotopique des échantillons de plantes a été effectuée par le Laboratoire de Chimie Physique Appliquée de l'Université de Gand (Belgique) la première année, et au Laboratoire de Seibersdorf de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique en deuxième année. L'utilisation d'isotopes implique qu'un fertilisant marqué est ajouté au sol, et la quantité de ce même nutriment absorbée par la plante est déterminée. Dans une expérimentation avec l'utilisation de ¹⁵N, la composition isotopique de l'azote (c'est-à-dire le rapport ¹⁵N/N total) de tout matériau peut être exprimée comme le pourcentage de ¹⁵N(%) ou simplement l'abondance isotopique en ¹⁵N(%). Ce rapport isotopique ou abondance en ¹⁵N(%) d'un échantillon est mesuré directement par simple détermination faisant appel à l'émission optique ou la spectrométrie de masse. L'abondance naturelle en ¹⁵N est 0,3366% atome de ¹⁵N, et cette valeur doit être soustraite de l'abondance en ¹⁵N de tout matériau enrichi en ¹⁵N pour obtenir l'excès isotopique en ¹⁵N.

La quantification de l'azote issu du fertilisant a été effectuée sur la base de la méthode de dilution isotopique à partir du Ndff (la fraction de N qui provient de l'engrais marqué au ¹⁵N), et du taux de l'engrais azoté appliqué. Elle permet d'exprimer l'efficacité d'utilisation des engrais, qui est une mesure quantitative du prélèvement réel du nutriment par la plante

comparativement à la quantité de nutriment apportée au sol sous forme de fertilisant. L'efficacité d'utilisation des engrais est communément appelée « recouvrement » ou « coefficient d'utilisation du fertilisant » ou « coefficient réel d'utilisation de l'engrais (CRU) ».

Les équations suivantes permettent de l'exprimer (AIEA, 2001):

$$\text{Ndff}(\%) = \frac{\text{Excès isotopique en }^{15}\text{N dans la plante}}{\text{Excès isotopique en }^{15}\text{N dans l'engrais}} \times 100 \quad (\text{Equation 1})$$

$$\text{N récolté venant de l'engrais} = \frac{\text{N de la récolte (kg ha}^{-1}) \times \text{Ndff}(\%)}{100} \quad (\text{Equation 2})$$

$$\text{Utilisation du fertilisant N}\% = \frac{[\text{N récolté venant du fertilisant (kg ha}^{-1})]}{\text{N apporté par le fertilisant (kg ha}^{-1})} \times 100 \quad (\text{Equation 3})$$

3.2.6. Analyses statistiques

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

3.3. Résultats

3.3.1. Variation des rendements du mil en fonction des doses et des combinaisons des fumures organo-minérales

Les doses des fumures ont eu un effet très significatif ($P < 0.01$) sur les rendements en grain du mil (Tableau II), indiquant ainsi que, tout comme les engrais minéraux, les doses de résidus de récolte et du fumier permettent d'accroître significativement les rendements du mil. En fonction des doses, l'accroissement du rendement en grains a varié de 5 à 36 %, 11 à 25% et 49 à 79 %, respectivement pour les résidus de récolte, le fumier et les engrais minéraux. Les résultats de 2008 et 2009 (Tableau III) indiquent que la combinaison de résidus (R2 : 2700 kg ha⁻¹) et de fumier (F2 : 2700 kg ha⁻¹) a induit un accroissement de rendement de 54 % en 2008 et de 49 % en 2009 ; celui-ci est toutefois moindre que celui obtenu avec la combinaison de résidus (R2 : 2700 kg ha⁻¹) et de fumier (F2 : 2700 kg ha⁻¹) avec l'engrais minéral (E2 45 kg N ha⁻¹ et 13,2 kg P ha⁻¹). Par rapport au témoin, les

combinaisons résidus- engrais et fumier-engrais ont conduit respectivement à un accroissement des rendements en grains de 103 % en 2008 et 115 % en 2009 et de 100 % en 2008 et de 112 % en 2009. L'effet de la triple combinaison (résidus + fumier + engrais minéral) a permis d'obtenir un accroissement du rendement en grains beaucoup plus intéressant de 134 % en 2008 et de 181 % en 2009.

Les résultats de l'analyse de variance de l'effet de la combinaison des fumures organiques et minérales et des systèmes de cultures sur les rendements du mil à Sadoré, sont présentés en annexe 2 et 3. En ce qui concerne l'effet des interactions organo-minérales en 2008, seule l'interaction résidu-engrais est significative. Quant à la combinaison avec le système de cultures, l'interaction résidu-culture est positive sur les deux ans, alors que l'interaction fumier-culture ne l'est qu'en 2008. Par contre, la combinaison résidu-engrais-fumier n'est pas significative. En fait, les comparaisons que nous avons effectuées portent sur la 1^{ère} et la 3^{ème} dose des traitements.

Tableau II : Variation du rendement en grains (kg ha⁻¹) du mil en fonction des doses des fumures à Sadoré.

Année	2008		2009	
	Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	Indice (%)	Rendement en grain (kg ha ⁻¹)	Indice (%)
Doses résidus				
300 kg ha ⁻¹ (R0)	678 ^c	100	844 ^b	100
900 kg ha ⁻¹ (R1)	769 ^b	117	890 ^b	105
2700 kg ha ⁻¹ (R2)	921 ^a	136	1071 ^a	127
Signification ¹	***		***	
Doses Engrais				
0N 0P (E0)	593 ^b	100	656 ^c	100
15N 4.4P (E1)	886 ^a	149	1013 ^b	154
45N 13.2P (E2)	890 ^a	150	1136 ^a	179
Signification ¹	***		***	
Doses Fumier				
300 kg ha ⁻¹ (F0)	705 ^c	100	840 ^c	100
900 kg ha ⁻¹ (F1)	781 ^b	111	933 ^b	111
2700 kg ha ⁻¹ (F2)	883 ^a	125	1032 ^a	123
Signification ¹	***		***	

1 : Signification statistique : ***significatif au seuil de probabilité p< 0,01 ;

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

Tableau III : Variation du rendement en grains du mil en fonction de la combinaison des fumures à Sadoré.

Années	2008		2009		
	Traitements	Rendement grains (kg ha ⁻¹)	Indice (%)	Rendement grains (kg ha ⁻¹)	Indice (%)
	R0 E0	485	100	576	100
	R2 E2	986	203	1237	215
	R0 F0	634	100	759	100
	R2 F2	979	154	1129	149
	E0 F0	472	100	577	100
	E2 F2	945	200	1222	212
	R0 E0 F0	426	100	453	100
	R2 E2 F2	997	234	1275	281

R0 E0 : 300 kg de résidu ha⁻¹ + 0N et 0P ha⁻¹; R2 E2 : 2700 kg de résidu ha⁻¹ + 45N et 13.2 P ha⁻¹; R0 F0 : 300 kg de résidu ha⁻¹ + 300 kg de fumier ha⁻¹; R2 F2 : 2700 kg de résidu ha⁻¹ + 2700 kg de fumier ha⁻¹; E0 F0 : 0N et 0P ha⁻¹ + 300 kg de fumier ha⁻¹; E2 F2 : 45N et 13.2 P ha⁻¹ + 2700 kg de fumier ha⁻¹; R0 E0 F0 : 300 kg de résidu + 0N et 0P + 300 kg de fumier ha⁻¹; R2 E2 F2 : 2700 kg de résidu + 45 N et 13.2 P + 2700 kg de fumier ha⁻¹.

3.3.2. Variation des rendements du mil en fonction des effets combinés de la rotation et des fumures

Le Tableau IV présente les effets de la rotation associée aux différentes fumures sur les rendements en grain du mil. L'influence de la rotation sur les fumures s'est traduite par une augmentation importante des rendements en grains. En 2008, cette augmentation a varié de 41 à 114 % en fonction des fumures ; en 2009, la variation a été de 3 à 86 %.

Tableau IV : Variation du rendement en grains du mil en fonction de la rotation et des fumures à Sadoré.

Année		2008		2009	
Traitements	Système de cultures	Grains (kg ha ⁻¹)	Indice (%)	Grains (kg ha ⁻¹)	Indice (%)
R0 x culture	Continu	611		890	
	Rotation	861	141 ¹	918	103 ¹
R2 x Culture	Continu	857	129 ²	1079	112 ²
	Rotation	1105	181 ³	1208	136 ³
E0 x culture	Continu	510		667	
	Rotation	758	149 ¹	768	115 ¹
E2 x culture	Continu	840	130 ²	1131	110 ²
	Rotation	1092	214 ³	1243	186 ³
F0 x culture	Continu	667		854	
	Rotation	873	131 ¹	913	107 ¹
F2 x culture	Continu	795	138 ²	992	117 ²
	Rotation	1097	164 ³	1164	136 ³

1 = effet de la rotation par rapport à la première dose (R0, F0, E0) des traitements ; 2 = effet de la rotation par rapport à la troisième dose (R2, F2, E2) des traitements ; 3 = effet de la troisième dose (R2, F2, E2) et de la rotation par rapport à la première dose (R0, F0, E0) des traitements.

Les effets de la combinaison matière organique et engrais minéraux associée à la rotation, sont présentés dans le Tableau V. La combinaison R2E2F2 associée à la rotation, a induit une augmentation du rendement en grain de 214 à 272%, soit plus de 3,5 fois les rendements de la monoculture du mil du système traditionnel.

Tableau V : Variation du rendement en grains du mil en fonction de la rotation et de la combinaison des fumures à Sadoré.

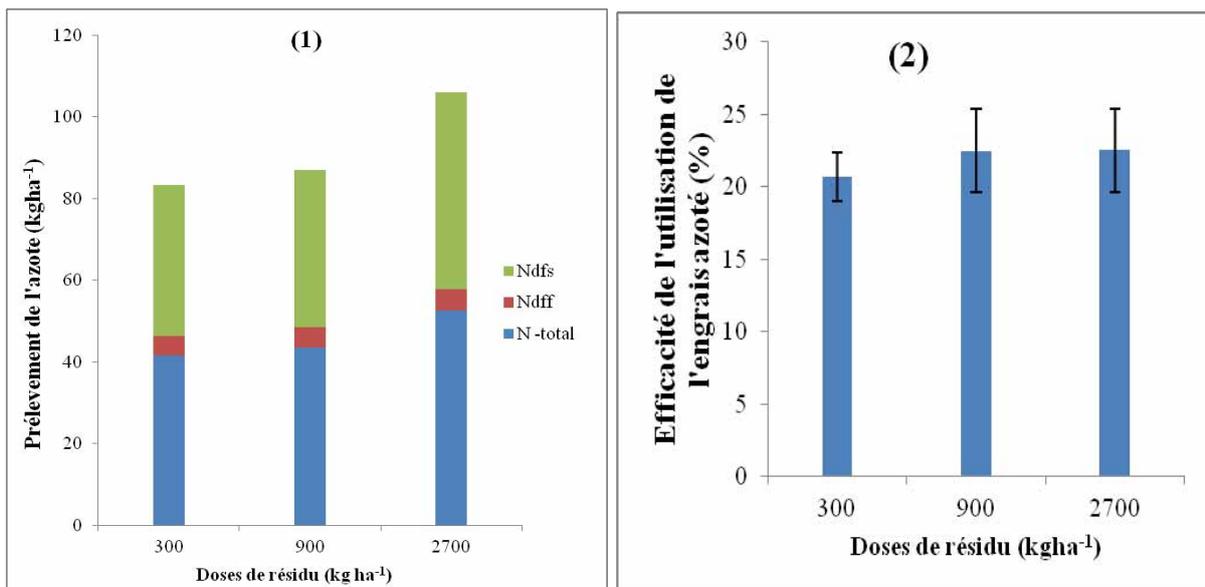
Année		2008		2009	
Traitements	Système de cultures	Grains (kg ha ⁻¹)	Indice (%)	Grains (kg ha ⁻¹)	Indice (%)
R0 E0	Continu	400		608	
	Rotation	647	162 ¹	662	109 ¹
R2 x E2	Continu	930	124 ²	1276	100 ²
	Rotation	1157	289 ³	1272	209 ³
R0 x F0	Continu	560		730	
	Rotation	781	139 ¹	768	105 ¹
R2 x F2	Continu	853	139 ²	1128	113 ²
	Rotation	1185	212 ³	1270	174 ³
E0 x F0	Continu	424		594	
	Rotation	601	142 ¹	641	108 ¹
E2 x F2	Continu	847	134 ²	1171	117 ²
	Rotation	1136	268 ³	1370	231 ³
R0 x E0 x F0	Continu	370		357	
	Rotation	470	127 ¹	457	128 ¹
R2 x E2 x F2	Continu	832	140 ²	1252	106 ²
	Rotation	1161	314 ³	1327	372 ³

1 = effet de la rotation par rapport à la première dose (R0, F0, E0) des traitements ; 2 = effet de la rotation par rapport à la troisième dose (R2, F2, E2) des traitements ; 3 = effet de la troisième dose (R2, F2, E2) et de la rotation par rapport à la première dose (R0, F0, E0) des traitements.

3.3.3. Contribution des fumures organo-minérales et du niébé à la nutrition azotée du mil

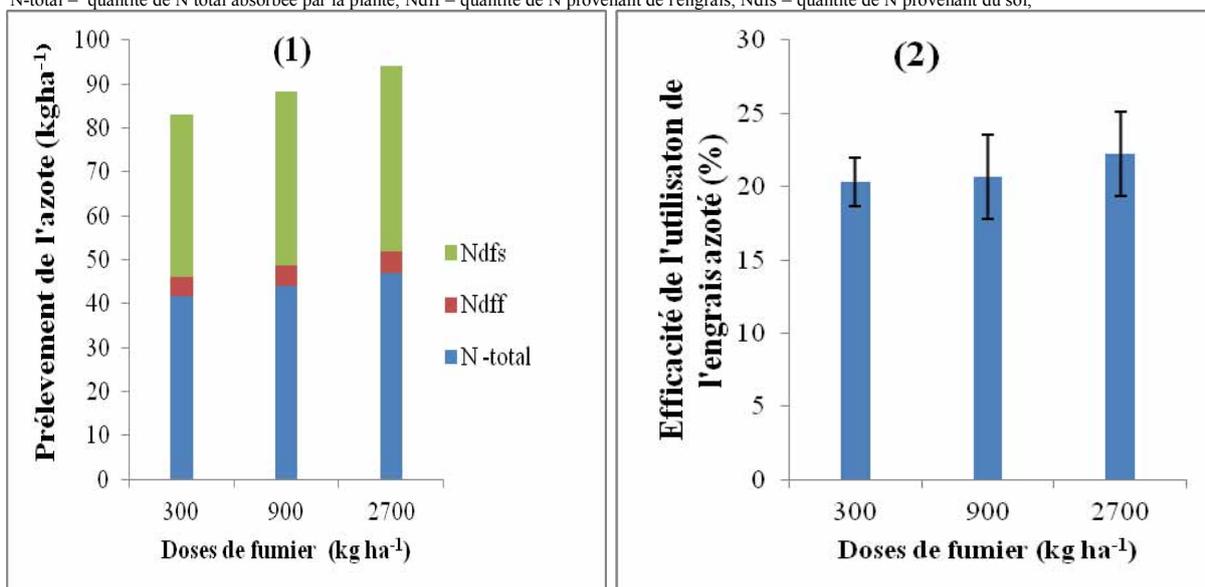
Le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté par le mil a été évalué par la méthode isotopique en utilisant l'urée marquée (¹⁵N) sur le traitement (E2= 45N ; 13,2 P) en présence de différentes doses de résidus et de fumier. Les doses de résidus et de fumier n'ont pas eu un effet significatif sur le coefficient d'utilisation de l'engrais azoté (Figures 11, 12, 13 et 14). Le coefficient réel d'utilisation de l'urée (CRU) par le mil en présence des doses de résidus de récolte et du fumier, a varié respectivement de 15,47 à 22,5 %, et de 16,22 à 22,23 %. Cependant, les systèmes de culture ont eu un impact sur l'utilisation de l'azote par le mil. Le précédent niébé a influencé de manière significative l'utilisation de l'azote par le mil en 2008 (Figure 15). Le taux de prélèvement de l'azote a atteint 60 kg N ha⁻¹ pour le mil en

rotation avec le niébé, alors qu'il était de 43 kg N ha⁻¹ pour la monoculture du mil. Dans le même temps, le CRU a varié de 30 % pour le mil en rotation, à 22 % pour la culture continue du mil. La rotation avec le niébé a également significativement amélioré le taux de prélèvement de l'azote du sol ; ainsi, le mil en rotation a prélevé 54 kg N ha⁻¹ du sol, contre 39 kg N ha⁻¹ pour le mil en monoculture en 2008. Ces paramètres n'étaient significativement différents en 2009 (figure 16).



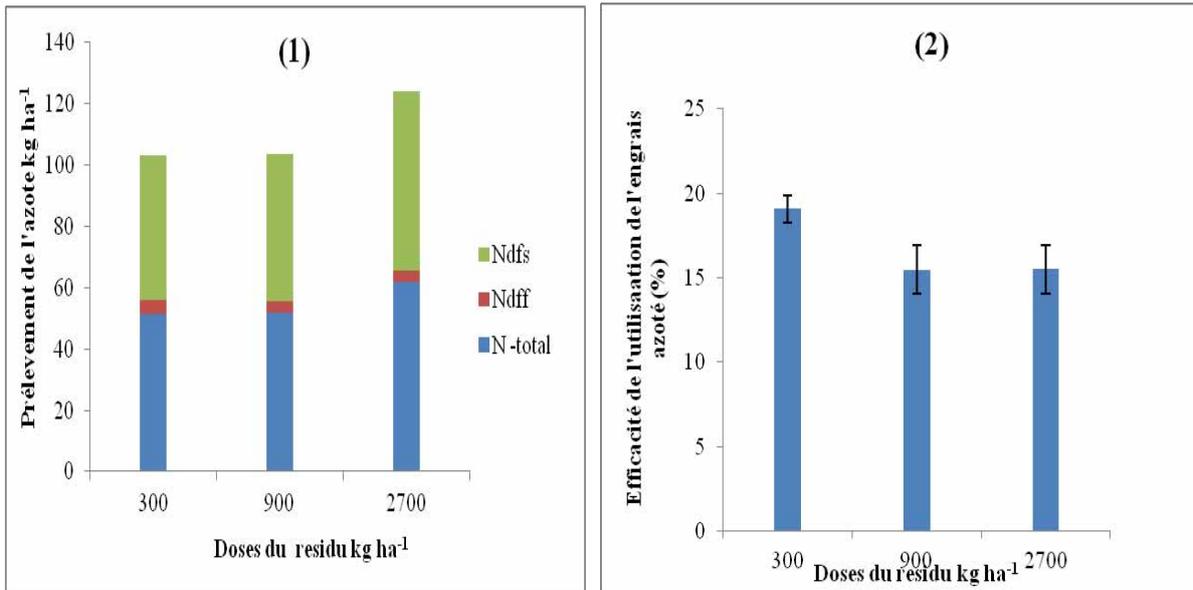
Figures 11: Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des doses de résidu de récolte en 2008

N-total = quantité de N total absorbée par la plante, Ndff = quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs = quantité de N provenant du sol,

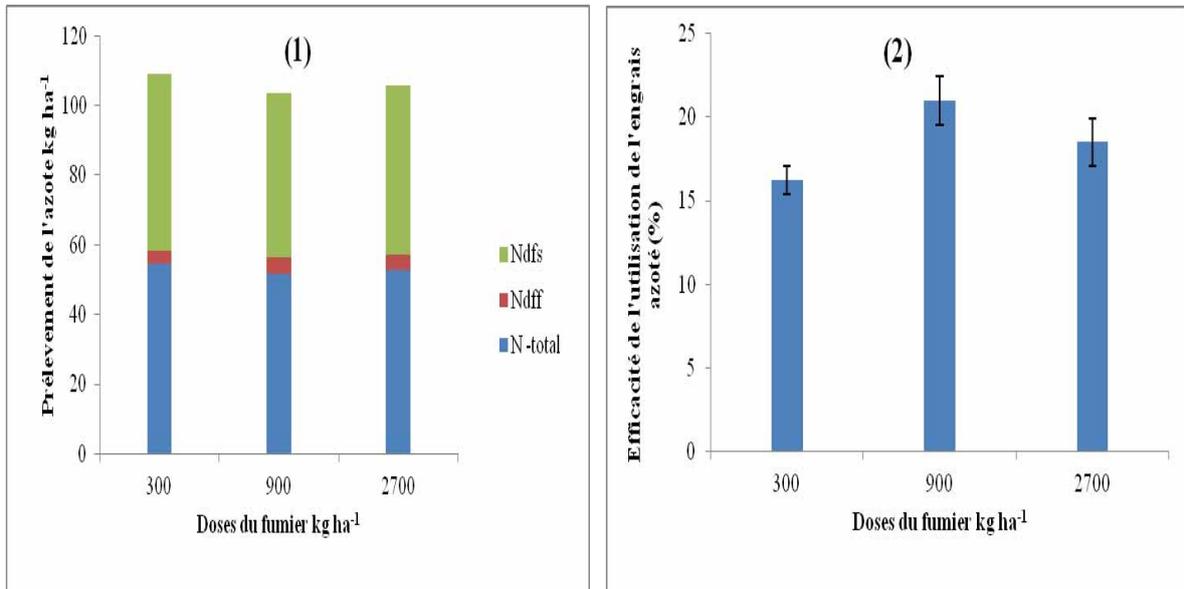


Figures 12 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des doses de fumier en 2008

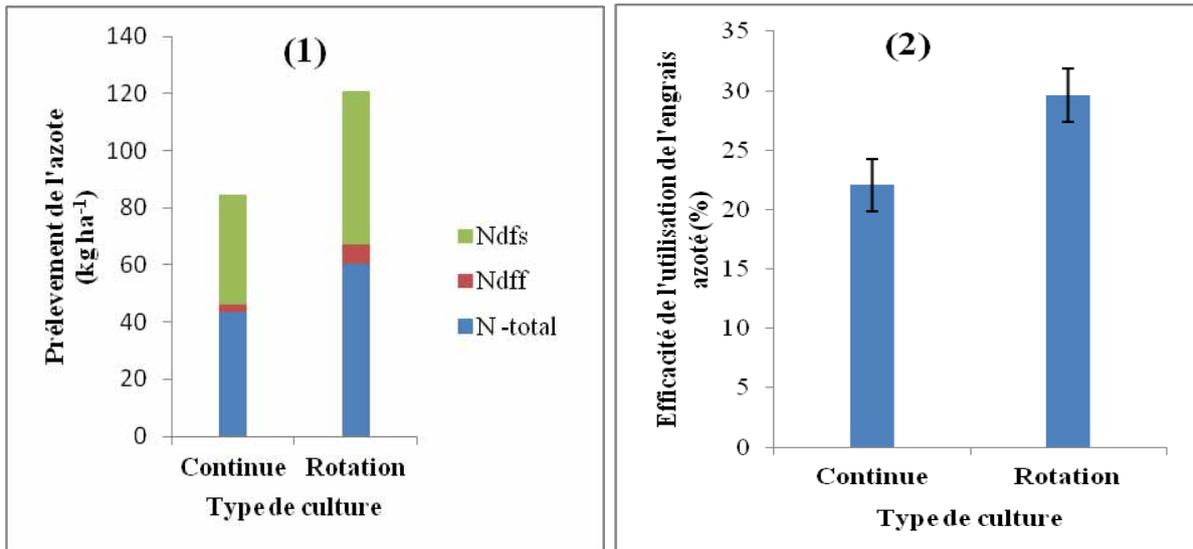
N-total = quantité de N total absorbée par la plante, Ndff = quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs = quantité de N provenant du sol



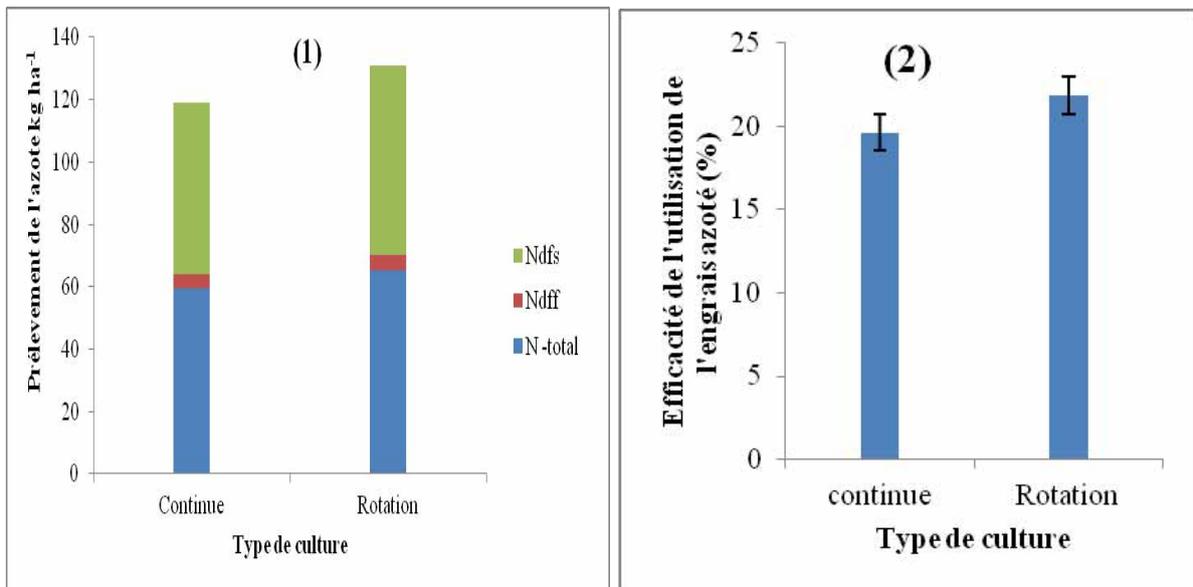
Figures 13:Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des doses de résidu de récolte en 2009
 N-total = quantité de N total absorbée par la plante, Ndff = quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs = quantité de N provenant du sol,



Figures 14 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des doses de fumier en 2009
 N-total = quantité de N total absorbée par la plante, Ndff = quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs = quantité de N provenant du sol



Figures 15 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des systèmes de cultures en 2008
 N-total = quantité de N total absorbée par la plante, Ndff = quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs = quantité de N provenant du sol



Figures 16 : Prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des systèmes de cultures en 2009
 N-total = quantité de N total absorbée par la plante, Ndff = quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs = quantité de N provenant du sol

3.4. Discussion

3.4.1. Effet des doses et des combinaisons des fumures organiques et minérales sur les rendements du mil

L'application des doses de résidus de culture a augmenté significativement les rendements du mil. Des résultats similaires ont été obtenus par Bationo *et al.* (2001). Buerkert *et al.* (2000) ont estimé l'augmentation de la matière sèche totale à plus de 73 % pour le Sahel. Ces auteurs ont attribué l'augmentation du rendement du mil suite à l'apport de résidu de récolte, à une amélioration de la nutrition en P, qui se fait à la fois par un accroissement de la disponibilité en phosphore suite à une chélation de l'Aluminium et du Fer, et à une stimulation de la croissance des racines. L'apport de résidus de récolte permet de réduire l'Aluminium échangeable, d'améliorer la saturation en base et la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, et de maintenir le niveau de carbone du sol. Il a été aussi mentionné une meilleure pénétration des racines, une augmentation de l'humidité du sol, et une amélioration de l'activité biologique du sol suite à l'application de résidu (Bationo *et al.*, 2001). L'apport des doses du fumier ont également conduit à un accroissement significatif des rendements du mil. L'amélioration des rendements des céréales par l'application du fumier a également été rapporté par plusieurs études (Ding *et al.*, 2010 ; Bationo *et al.*, 2012 ; Kiba, 2012 ; Gomgnimbou *et al.*, 2014) ; dans certains cas, un apport de 5 t ha⁻¹ de fumier a permis de doubler le rendement du mil. L'apport du fumier joue un rôle très important dans le recyclage des éléments nutritifs, la fertilité du sol, et l'amélioration de la production agricole. En neutralisant la faible acidité des sols et en apportant des éléments nutritifs aux plantes, le fumier améliore la nutrition minérale, entraînant une augmentation des rendements des cultures (Pallo *et al.*, 2006 ; Ouattara, 2009).

Les doses d'engrais minéraux ont, comme il fallait s'y attendre, également eu un effet significatif sur les rendements en grains du mil. En général, les engrais minéraux produisent un effet spectaculaire sur les rendements du mil. De nos jours, il n'est plus utile de tester l'efficacité agronomique des engrais minéraux utilisés seuls, car de nombreuses études ont montré leur effet positif à court terme, mais également leur effet négatif à long terme sur la dégradation chimique des sols (baisse du pH et augmentation de l'Aluminium échangeable notamment) entraînant de ce fait une réduction de rendement (Bado, 2002 ; Mills *et al.*, 2003). Compte tenu des effets limités des fumures organiques et minérales prises séparément,

il est mieux indiqué de procéder à leur combinaison en vue d'accroître durablement la production agricole. Les interactions entre engrais minéraux et matière organique observées ici n'étaient pas statistiquement significatives, indiquant que ces facteurs influencent de la même façon les rendements. On note néanmoins, une augmentation importante des rendements avec ces combinaisons. Un accroissement de rendement de l'ordre 49 à 54 % a été obtenu avec la combinaison de résidus (2700 kg ha⁻¹) et de fumier (2700 kg ha⁻¹) ; mais cet accroissement était moins important que celui obtenu avec la combinaison de résidus ou de fumier avec l'engrais minéral (45 N ; 13,2 P). Les augmentations des rendements en grains des combinaisons résidus-engrais et fumier-engrais, étaient respectivement de 103 à 115 %, et de 100 à 112 %. L'effet de la triple combinaison de ces fumures (résidus + fumier + engrais minéral), était encore plus important : de l'ordre de 134 à 181 %. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Bationo *et al.* (2004), Achieng *et al.* (2010), Fening *et al.* (2011) et Bationo *et al.* (2012). Bationo *et al.* (2001) ont obtenu un rendement en grain du mil de 160 kg ha⁻¹ pour le champ témoin, contre 770 kg ha⁻¹, 1030 kg ha⁻¹ et 1940 kg ha⁻¹ respectivement pour des champs traités aux résidus de récolte, à l'engrais minéral et à la combinaison résidus de récolte et fumure minérale. Ceci montre donc très bien l'importance de la fertilisation organo-minérale sur l'amélioration des rendements agricoles.

3.4.2. Effets combinés de la rotation et des fumures

L'effet de la rotation avec la légumineuse a significativement amélioré les rendements des traitements. L'accroissement des rendements de la céréale suite à la rotation avec des légumineuses, a été rapporté par plusieurs auteurs dont, entre autres, Subbarao *et al.* (2000) ; Bationo *et al.* (2002) ; Bado *et al.* (2006). La combinaison R2E2F2 (2700 kg ha⁻¹ de paille de mil + 45 N et 13,2 P + 2700 kg ha⁻¹ de fumier) associée à la rotation, a provoqué une augmentation de rendement en grains correspondant à plus de 3,5 fois les rendements en monoculture de mil du système traditionnel. Il a aussi été rapporté un accroissement de rendement de l'ordre de 16 à 353 %, dû au précédent légumineux. Tous ces accroissements de rendement attestent de l'importance de la culture de la légumineuse sur la culture subséquente du mil. L'effet bénéfique observé peut être attribué à l'N fixé par la légumineuse, au N économisé sous la culture de la légumineuse, et à la libération de N provenant de la décomposition des résidus de la légumineuse (Bado, 2002). Mais l'apport de l'azote atmosphérique n'explique pas toujours les rendements souvent élevés de la céréale

subséquente (Bationo et Ntare, 2000). D'autres effets bénéfiques des légumineuses semblent intervenir dans l'accroissement des rendements, et le terme « effet rotation » serait mieux adapté pour désigner l'impact positif des précédents légumineux (Bado, 2002). L'augmentation des rendements est particulièrement plus élevée dans les cas de combinaisons de la matière organique avec les engrais minéraux associée à la rotation, mettant ainsi en évidence le rôle que jouent ces stratégies de gestion des ressources sur la productivité des sols. De nombreuses études ont montré l'importance de la rotation dans les systèmes de cultures céréales légumineuses, et plus particulièrement le rôle principal que joue l'interaction matière organique et engrais minéraux associée à la rotation avec une légumineuse sur la production agricole dans les zones sahéliennes (Subbarao *et al.*, 2000 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2006 ; Bado *et al.*, 2012).

3.4.3. Contribution des fumures organo-minérales et de la rotation avec le niébé, sur la nutrition azotée du mil

La variation du coefficient réel d'utilisation de l'urée par le mil en présence des doses de résidus de récolte et du fumier, était respectivement de 15,47 à 22,5 %, et de 16,22 à 22,23 %. Il a été rapporté par Christianson *et al.* (1990) que le taux de prélèvement de l'engrais azoté par la plante se situe entre 20 et 37 %, alors que les pertes d'azote peuvent aller jusqu'à 53 %. La gestion de l'engrais azoté constitue une préoccupation dans les sols sableux du sahel. En effet, leur recouvrement est faible du fait des pertes importantes par volatilisation (Bonzi, 2002 ; Guillaume *et al.*, 2011 ; Miao *et al.*, 2011). Cleemput *et al.* (2008) ont rapporté que les plus faibles valeurs de recouvrement de l'azote ont été trouvées en Afrique, à cause des facteurs limitants de croissance comme le manque d'eau, l'acidité du sol et la déficience en éléments nutritifs. En effet, le sol de Sadoré est très sableux, fortement acide et pauvre en phosphore. Sa teneur en carbone est faible, ce qui explique la très faible capacité d'échange cationique (Tableau I, Chapitre II). La pluviosité moyenne est de 505 mm (Figure 5, Chapitre II).

En outre, le précédent niébé a influencé de manière significative l'utilisation de l'azote par le mil en 2008 (Figure 15), mais les variations de 2009 n'étaient pas significativement différentes. Par rapport à la monoculture du mil, l'effet du précédent niébé sur le mil en 2008 a augmenté le taux de prélèvement de l'azote de 17 unités. L'effet de la rotation a également

amélioré le coefficient réel de l'utilisation de l'azote par le mil, de 30 % contre 22 % pour le mil en monoculture. Dans une étude réalisée à Sadoré par Bationo *et al.* (2002), le coefficient d'utilisation de N est passé de 20 % pour la culture pure de mil à 28 % pour le mil en rotation avec le niébé. Sur le sorgho, Bado *et al.* (2012) ont obtenu un coefficient réel d'utilisation de N de 22 % pour la rotation niébé- sorgho, contre 17 % pour la monoculture du sorgho. La rotation des cultures améliore donc significativement le taux de prélèvement de l'azote du sol par les céréales. Ainsi, le mil subséquent a prélevé 54 kg N ha⁻¹ du sol, contre 39 kg N ha⁻¹ pour le mil en monoculture en 2008. Une étude précédente sur le même site a montré que l'utilisation de l'azote du sol a augmenté de 39 kg N ha⁻¹ dans la monoculture de la céréale, à 62 kg N ha⁻¹ dans le système de la rotation céréale-légumineuse (Bationo *et al.*, 2002).

3.5. Conclusion partielle

Les résultats de cette étude ont montré que les résidus de récolte, le fumier ou les engrais minéraux, pris séparément, permettent une amélioration des rendements. Mais ces augmentations de rendement ne sont pas suffisantes pour assurer une production agricole importante. La combinaison de ces fumures est mieux indiquée pour un accroissement substantiel des rendements. L'effet de la combinaison des fumures organiques et minérales sur les rendements du mil, est d'autant plus élevé qu'elle est associée à la rotation avec des légumineuses comme le niébé. L'utilisation de la méthode isotopique (¹⁵N) pour évaluer la contribution du niébé et des fumures sur la nutrition azotée du mil, a permis de mettre en évidence le rôle important que joue la rotation avec les légumineuses dans les systèmes de culture céréale-légumineuse. La présence de la légumineuse a amélioré le taux de prélèvement de l'azote, la mobilisation de l'azote du sol et l'efficacité de l'utilisation des engrais minéraux par le mil. La combinaison des fumures organiques et minérales associée à la rotation du mil avec les légumineuses, permet une amélioration considérable des rendements de la céréale, une meilleure mobilisation de l'azote du sol et une utilisation efficiente de l'engrais azoté. Elle peut donc être recommandée comme mode de gestion intégrée de la fertilité des sols.

Chapitre IV. Impact des modes de gestion de la fertilité du sol et des systèmes de cultures sur la nutrition azotée et les rendements du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) au Niger²

4.1. Introduction

L'agriculture représente plus de 25 % du produit intérieur brut (PIB) de la plupart des pays africains, et est la principale source de revenus et d'emplois pour au moins 65 % de la population de l'Afrique estimée à 750 millions (Henaou et Baanante, 2006). Selon ces mêmes auteurs, le développement agricole est essentiel à la croissance économique de l'Afrique, à la sécurité alimentaire et à la lutte contre la pauvreté. Cependant, l'agriculture des pays sahéliens est caractérisée par une faible productivité agricole. Les sols ont une faible fertilité intrinsèque et les éléments nutritifs exportés par les cultures ne sont pas restitués de manière adéquate. Or, une gestion intégrée et durable de la fertilité des sols constitue une condition préalable à l'amélioration de la productivité agricole. Cette gestion de la fertilité doit prendre en compte l'utilisation des fumures minérales et organiques et des légumineuses, tout en valorisant les ressources naturelles locales organiques et minérales (Winterbottom et al 2013 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Achieng *et al.*, 2010).

Par ailleurs, au Sahel, les sols sont très pauvres en phosphore. Les engrais phosphatés solubles manufacturés sont généralement recommandés pour corriger cette insuffisance. La valorisation des phosphates naturels pourrait contribuer à résoudre les problèmes de la déficience en phosphore des sols (Zapata et Roy, 2004 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Mokwuneye et Bationo, 2011). Sur la base de leurs caractéristiques minéralogiques, chimiques et texturales, plusieurs auteurs ont indiqué l'adéquation de leur application directe (Zapata et Roy, 2004 ; Bationo et Waswa, 2011). Au Niger, il a été démontré que les roches phosphatées des gisements de Tahoua sont aptes pour une application directe, alors que celles du Parc du W le sont moins (Bationo et Waswa, 2011). Selon une étude effectuée sur la caractérisation physico-chimique du phosphate naturel de Tahoua (PNT) (Natatou *et al.*, 2005), ce phosphate

² Ce chapitre a été publié dans la Revue Tropicultura sous la citation : **Hamidou Z.**, Mahamane S. Payne W., Sedogo M., Lompo F., Nacro H.B., 2016. Impact des modes de gestion de la fertilité du sol et des systèmes de cultures sur la nutrition azotée et les rendements du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) au Niger. Tropicultura, 34, 4.

naturel est un phosphate sédimentaire de type nodulaire, appartenant à la famille des apatites. Sa quantité a été estimée à 7,5 millions de tonnes (Johnson, 1995). En outre, l'efficacité agronomique des phosphates naturels peut être améliorée lorsqu'ils sont incorporés dans le système de compostage de résidus organiques (Zapata et Roy, 2004 et Lompo *et al.*, 2009). L'utilisation de cette dernière constitue un préalable pour la restauration et le maintien de la fertilité des sols (Vanlauwe et Giller, 2006 ; Ouédraogo *et al.*, 2014). Cependant, le problème de sa disponibilité en quantité et en qualité se pose au Sahel (Lompo *et al.*, 2009 ; Bationo *et al.*, 2011 ;). Or le compostage des résidus organiques permet une valorisation plus efficace de ceux-ci pour améliorer la fertilité du sol (Houot *et al.*, 2002 ; Huber et SChaub, 2011). La décomposition des débris organiques améliore en effet le processus de minéralisation et donc, la disponibilité des nutriments pour les plantes. Le compostage des débris organiques généralement à C/N élevé, permet également de réduire l'immobilisation d'azote qui se produit lorsqu'ils sont décomposés par les microorganismes du sol. Par ailleurs, compte tenu du faible pouvoir d'achat des producteurs, la technique de la micro-dose des engrais est pratiquée (Bationo et Waswa, 2011) et constitue une technologie prometteuse pour les producteurs (Bationo *et al.*, 2003 ; Tabo *et al.*, 2007 ; Tabo *et al.*, 2011).

De plus, les légumineuses fixatrices d'azote sont une opportunité pour améliorer la disponibilité de l'azote du sol et augmenter le rendement des céréales subséquentes et associées (Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2012). C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude, avec l'hypothèse qu'une gestion intégrée des fumures, associée au potentiel de fixation de l'azote par les légumineuses, permet d'améliorer la nutrition azotée et les rendements du mil. Les objectifs étaient d'évaluer la contribution du niébé et des modes de gestion de différents types de fumure sur la nutrition azotée du mil et d'identifier des modes de gestion de la fertilité du sol à la portée des producteurs, permettant d'améliorer rentablement les rendements des cultures.

4.2. Matériels et Méthodes

4.2.1. Site de l'étude

Les expérimentations agronomiques ont été réalisées sur trois campagne agricole d'hivernage (2011-2013) sur le site de Kalapaté, qui a été présenté au chapitre II.

4.2.2. Sols

Les sols ont été caractérisés avant le début de l'expérimentation. Les analyses ont été effectuées au laboratoire des sols de l'Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN) selon les procédures qui y ont cours (Manu et Salou, 1988) :

- Le pH-H₂O et pH- KCl ont été mesurés au pH-mètre selon un rapport sol/eau distillée et/ou solution de KCl de 1/2,5 par la méthode AFNOR (1981) ;
- Le phosphore assimilable a été dosé par la méthode Bray1 (Bray et Kurtz, 1945), qui consiste à extraire les formes de phosphore solubles dans les acides en grande partie celle liée au calcium, et une portion liée à l'aluminium et au fer à l'aide d'une solution mixte d'acide chlorhydrique (HCl) à 0,025 M et de fluorure d'ammonium (NH₄F) à 0,03 M ;
- Le phosphore total par la méthode de l'acide nitrique (Bray et Kurtz, 1945) ;
- Le carbone organique a été dosé selon la méthode Walkey et Black (1934), qui consiste en une oxydation à froid du carbone du sol avec du bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) 1N en présence d'acide sulfurique concentré (H₂SO₄). L'excès du bichromate est dosé par du sel de Mohr Fe(SO₄)₂(NH)₂ en présence d'indicateur coloré ;
- L'azote total par la méthode Kjeldahl (Hillebrand *et al.*, 1953). La minéralisation se fait avec de l'acide sulfurique concentré en présence de catalyseur (sulfate de potassium ou de sodium, sulfate de cuivre et de sélénium). Après dilution du produit de la digestion, l'azote sous forme d'ammonium est distillée et recueillie dans de l'acide borique, puis déterminée par titration ; La capacité d'échange cationique effective (CECE) correspond à la somme des bases du complexe d'échange. Ce sont donc les bases échangeables et l'acidité d'échange), extraites respectivement par les solutions de l'acétate d'ammonium et de chlorure de

potassium, dosées par spectrométrie d'absorption atomique, photométrie à flamme et titrimétrie (Pelloux *et al.*, 1971) ;

- L'analyse granulométrie a été effectuée selon la méthode de la pipette de Robinson (Delaune *et al.*, 1991).

Les sols appartiennent à la classe des lixisols (IUSS Working Group WRB, 2015).

4.2.3. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué du Mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) variété HKP, et de quatre variétés de niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) : K VX 30-309-6G ; variété Locale Kalpaté ; TN5-78 ; et IT90K- 372-1-2. Ces variétés ont été utilisées à cause de leur cycle court, de leur résistance à la sécheresse et de leur potentiel de rendement (annexes 8, 9, 10 et 11). Ce pendant l'effet de la variété n'a pas pu être évalué à cause d'une modification de la structure du carré latin par la suite.

4.2.4. Fumure

Les fertilisants suivants ont été utilisés :

- Urée 46 % N ;
- NPK : 15 N - 15 P₂O₅ - 15K₂O ;
- Super Phosphate Simple (SPS) : 18 % de P₂O₅ ;
- Phosphate Naturel de Tahoua (PNT) dont la composition chimique est donnée dans le Tableau VI (31,24 % de P₂O₅) ;
- Phospho-Compost (P C), préparé selon les procédures recommandées localement (INRAN, 1998 ; Gnankambary *et al.*, 2009).

Tableau VI : Composition chimique du phosphate naturel de Tahoua

Eléments majeurs	Pourcentage (%)	Eléments traces	(ppm)
CaO	43,12	Ti	500
P ₂ O ₅	31, 24	Nd	438,3
Fe ₂ O ₃	8,68	Sr	430,5
Al ₂ O ₃	1,84	Zn	136,5
Na ₂ O	0,26	As	68,2
K ₂ O	0,12	Ni	61,4
Y ₂ O ₃	0,16	U	34,8
MgO	0,2	Ba	21,3
MnO	0,1	Cr	19,5
SiO ₂	8	Pb	7,9
		Cu	5,4
		Cd	3,1

(Source : Natatou *et al.*, 2005)

4.2.5. Dispositif expérimental

Les traitements ont été appliqués sur des parcelles de 50 m² (10 m x 5 m) dans quatre systèmes de cultures impliquant le mil et le niébé : (i) niébé en rotation avec le mil ; (ii) niébé en association avec le mil (cultivés en continu); (iii) la culture en bandes du mil et du niébé et (iv) deux traitements témoins correspondant à la culture du mil ou du niébé en pur et en continu. Les combinaisons systèmes de culture et variétés de niébé, ont été cultivées selon cinq technologies identifiées A (Témoin), B (NPK), C (Phosphate naturel de Tahoua, PNT), D (Phospho-compost) et E (SPS) :

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

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

- Technologie B (NPK) ou Moyenne 1, avec une densité de 17 777 poquets ha⁻¹ (0,75 m x 0,75 m), et où 6g de NPK (15-15-15) ont été appliqués par poquet en ligne, au semis. L'urée à raison de 30 kg N ha⁻¹ a été apportée en deux fractions dans les parcelles principales, au tallage et à la montaison. Le NPK et l'urée ont été marqués à 1 % d'isotope ¹⁵N (Axmann et Zapata, 1990). Pour évaluer la contribution des fumures et du niébé à la nutrition azotée du mil, le NPK et l'urée marqués ont été appliqués sur les micro-parcelles du mil, au moment où le NPK et l'urée ordinaires ont été apportés aux parcelles principales. Les micro-parcelles, délimitées par des tôles, contiennent quatre poquets de mil ;
- Technologie C (PNT) ou Moyenne 2, avec une densité de 17 777 poquets ha⁻¹ (0,75 m x 0,75 m) et où 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ont été appliqués sous forme de Phosphate Naturel de Tahoua (PNT), soit 130 kg PNT ha⁻¹ au poquet en ligne, au semis. L'urée ordinaire et l'urée marquée à 1%, à la dose de 30 kg N ha⁻¹, ont été apportées en deux fractions au tallage et à la montaison, respectivement sur les parcelles principales et les micro-parcelles ;
- Technologie D (Phospho-compost) ou Moyenne 3, avec une densité 17 777 poquets ha⁻¹ (0,75 m x 0,75 m), et où 5 t ha⁻¹ de Phospho-compost ont été appliqués autour des plants au tallage, ce qui correspond à 25 kg P₂O₅ ha⁻¹. L'urée ordinaire et l'urée marquée à 1 %, à la dose de 30 kg N ha⁻¹, ont été apportées en deux fractions au tallage et à la montaison, respectivement sur les parcelles principales et les micro-parcelles.

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

exclues de l'exploitation des données, car à cause de l'exiguïté des parcelles de 50 m², les bandes de mil et de niébé ne peuvent pas être répétées.

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

Le dispositif expérimental est un carré latin, en alternant les traitements D (phospho-compost) et E(SPS) (figure 17). Il a été répété trois fois comme l'indique la figure 18. Il comprend 4 technologies, 4 systèmes de cultures et 4 variétés de niébé. Pour des mesures de précaution compte tenu des aléas climatiques nous avons jugé utile de le répéter trois fois afin d'éviter la perte des données en cas de problème avec un seul bloc. Après installation de l'essai, il a été constaté que la superficie de 50 m² ne convient pas à la culture en bande où les bandes de mil et de niébé doivent se répéter plusieurs fois. Ainsi la culture en bande n'a pas été considérée dans l'analyse de variance ni dans l'interprétation des données.

	A Faibles (pas d'intrant)	B Moyenne 1 (Microdose NPK)	C Moyenne 2 (PNT)	D Moyenne 3 Phospho- compost	E Forte (SPS)
I Rotation entre mil et niébé chaque saison	I x Niébé	I y Niébé	I z Niébé	I aa Niébé	I aa Niébé
	I x Mil	I y Mil	I z Mil	I aa Mil	I aa Mil
II Cultures Intercalaires mil et niébé	II aa	II z	II x	II y	II y
III Cultures en bandes mil et niébé	III y	III x	III aa	III z	III z
IV Cultures continues Mil et niébé	IV z Niébé	IV aa Niébé	IV y Niébé	IV x Niébé	IV x Niébé
	IV z Mil	IV aa Mil	IV y Mil	IV x Mil	IV x Mil

Figure 17: Dispositif expérimental du site de Kalapaté

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

En vue d'évaluer la contribution des fumures organo-minérales et du niébé à la nutrition azotée du mil, le NPK marqué ^{15}N à 1 % a été appliqué au semis, sur les micro-parcelles du mil au niveau du traitement B (NPK). Dans le même cadre, l'urée marquée ^{15}N à 1 % a été appliquée sur le mil des micro-parcelles, au tallage et à la montaison, au niveau des traitements B (NPK), C (PNT) et D (Phospho-compost). La partie aérienne des poquets centraux des micro-parcelles du mil a été récoltée à la maturité physiologique. Les échantillons ont été séchés d'abord à l'air pendant 8 jours et à l'étuve à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 72 heures, puis pesés et broyés pour le dosage de l'azote total et des excès de ^{15}N . L'analyse isotopique des échantillons de plantes a été effectuée par le laboratoire de spectrométrie de masse des isotopes stables de l'Université de Floride. La quantification de l'azote issu du fertilisant a été effectuée sur la base de la méthode de dilution isotopique à partir du Ndff (la fraction de N qui provient de l'engrais) et du taux de l'engrais azoté appliqué, selon les équations suivantes (AIEA, 2001):

$$\text{Ndff}(\%) = \frac{\text{Excès isotopique en } ^{15}\text{N} \text{ dans la plante}}{\text{Excès isotopique en } ^{15}\text{N} \text{ dans l'engrais}} \times 100 \text{ (Equation 1)}$$

$$\text{N récolté venant de l'engrais} = \frac{\text{N de la récolte (kg ha}^{-1}\text{)} \times \text{Ndff}(\%)}{100} \text{ (Equation 2)}$$

$$\text{Utilisation du fertilisant} = \frac{\text{N récolté venant de l'engrais}}{\text{N venant de l'engrais}} \times 100 \text{ (Equation 3)}$$

4.2.7. Expression de l'accroissement du rendement (Indice %)

L'accroissement du rendement a été estimé en utilisant l'équation suivante :

$$\text{Taux d'accroissement} = \frac{\text{Rendement du traitement (kg ha}^{-1}\text{)} \times 100}{\text{Rendement du témoin (kg ha}^{-1}\text{)}} \text{ (Equation 4)}$$

4.2.8. Evaluation du Land Equivalent Ratio (LER)

L'association des cultures permet de rendre compte de l'utilisation efficace de la terre, à travers la détermination du Land Equivalent Ratio (LER). Le LER est défini comme la superficie relative des terres en culture pure, nécessaire pour produire les mêmes rendements que la culture associée (Mohammed, 2012). Il correspond à la somme des ratios de rendement (*Land Equivalencies* – LE) des deux cultures (culture associée/culture pure en continu), et a été calculé selon la formule suivante (Mohammed, 2012) :

$$\text{LER} = \frac{\text{Rendement du mil en association}}{\text{Rendement du mil en pur}} + \frac{\text{Rendement du niébé en association}}{\text{Rendement du niébé en pur}} \quad (\text{Equation 5})$$

On a alors :

$$\text{LER} = \text{LE mil} + \text{LE niébé} \quad (\text{Equation 6})$$

4.2.9. Analyses statistiques

Les effets des fumures organo-minérales, de l'association et de la rotation sur les rendements du mil, les taux de prélèvement et le recouvrement de N, ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel Genstat version Discovery 4 (GenStat Discovery, 2007). La séparation des moyennes a été effectuée par l'option contraste et le test de Duncan au seuil de 5% avec SPSS.

4.3. Résultats

4.3.1. Effet des fumures sur les rendements du mil

Les résultats présentés correspondent à la moyenne de 2011 et 2013. Les données de 2012 n'ont pas pu être exploitées, compte tenu des pluies abondantes enregistrées en cette année et qui ont causé l'inondation des parcelles. Le rendement moyen en grains de mil pour l'ensemble des systèmes de cultures comparés, a été de 135 kg ha⁻¹ pour le témoin sans apport de fertilisants, contre 538, 533, 340 et 291 kg ha⁻¹ respectivement pour les traitements E (SPS), B (NPK), C (PNT) et D (Phospho-compost) (Tableau VII). Ces résultats indiquent une

différence très significative entre le témoin A (faible technologie) et les autres traitements (technologies moyennes (B(NPK), C (PNT), D (Phospho-compost) et forte (E(SPS)). Les traitements E(SPS) et B(NPK) ont donné les rendements les plus élevés et ne sont pas statistiquement différents. Mais ils sont significativement différents des traitements C(PNT) et D (Phospho-compost) qui eux, sont statistiquement identiques. On observe un accroissement de rendement en grains par rapport au témoin de : 299, 295, 152 et 116 % respectivement pour E (SPS), B (NPK), C (PNT), et D (Phospho-compost). Le rendement en paille du témoin est de 435 kg ha⁻¹ contre 1557, 1484, 1100 et 968 kg ha⁻¹ respectivement pour E(SPS), B(NPK), C(PNT) et D(Phospho-compost, avec un taux d'accroissement dans le même ordre de 258, 241, 153 et 123 % (Tableau VII). La grande hétérogénéité observée au niveau du site peut expliquer, entre autres, Les valeurs élevées des coefficients de variations au niveau des tableaux (VII et VIII)

Tableau VII : Variation des rendements en grains et paille de mil de l'ensemble des systèmes de cultures comparés en fonction des modes de gestion de la fertilité du sol à Kalapaté.

Traitement	Grain kg ha ⁻¹	Indice %	Paille kg ha ⁻¹	Indice %
E (SPS)	538a	399	1557a	358
B (NPK)	533a	395	1484a	341
C (PNT)	340b	252	1100b	253
D(Phosphocompost)	291b	216	968b	223
A (Témoin)	135c	100	435c	100
Signification ¹	***		***	
CV%	53		42	

A : Témoin ; B : ajout de NPK ; C : ajout de PNT ; D : ajout de Phospho-compost, E : ajout de SPS.

1 : Signification statistique : *** significatif au seuil de probabilité de p<0,01.

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

4.3.2. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du mil

La rotation niébé-mil a eu un impact significatif sur les rendements du mil avec une production moyenne en grains de 452 kg ha⁻¹, contre 321 kg ha⁻¹ pour la culture continue du mil (Tableau VIII). Cette rotation a induit un accroissement de 41 % par rapport à la monoculture du mil. L'effet de la rotation a été observé au niveau de tous les traitements (Tableau IX), sauf au niveau du traitement B(NPK) pour la moyenne du rendement en grains. Toutefois, le mil en association (329 kg ha⁻¹) et le mil en culture continue (321 kg ha⁻¹) ne présentent pas de différence significative. Le rendement en paille du mil en rotation est de 1370 kg ha⁻¹, avec une augmentation significative de 28 % par rapport au rendement de

la culture pure (Tableau VIII). Pour la paille aussi, il n'y a pas eu de différence significative entre le mil en culture pure et le mil en association. Au niveau de la moyenne des traitements, l'association mil-niébé a enregistré un LER de 1,46. Selon les traitements, le LER a varié de 0,56 pour le témoin (Traitement A, faible technologie), à 1,52 pour le traitement E (forte technologie SPS) (Tableau X). A l'exception du témoin, la valeur des LER est toujours supérieure à 1.

Tableau VIII : Variation des rendements en grains et paille de mil en fonction des systèmes de cultures à Kalapaté.

Culture	Grain kg ha ⁻¹	Indice %	Paille kg ha ⁻¹	Indice %
Rotation	452a	141	1370a	128
Association	329b	102	888b	83
Continu	321b	100	1068b	100
Signification ¹	*		***	
CV%	53		42	

1 : Signification statistique : *, *** significatif au seuil de probabilité de p<0,05 et p< 0,01 respectivement.

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

Tableau IX : Variation du rendement en grains en fonction des traitements et des systèmes de cultures à Kalapaté.

Traitement	Rendement	Rotation	Association	Continue
E (SPS)	Grain kg ha ⁻¹	551	348	375
	Indice %	147	93	100
B (NPK)	Grain kg ha ⁻¹	589	409	600
	Indice %	98	69	100
C (PNT)	Grain kg ha ⁻¹	399	221	253
	Indice %	158	55	100
D (Phospho-compost)	Grain kg ha ⁻¹	550	211	259
	Indice%	212	38	100
A (Témoin)	Grain kg ha ⁻¹	169	114	121
	Indice %	140	67	100

A : Témoin; B : ajout de NPK; C : ajout de PNT; D : ajout de Phospho-compost, E : ajout de SPS.

Tableau X : Variation du *Land Equivalent Ratio* (LER) en fonction des traitements.

Traitement	LER
E (SPS)	1,52
B (NPK)	1,45
C (PNT)	1,2
D (Phospho-compost)	1,139
A (Témoin)	0,56
Moyenne	1,46

A : Témoin; B : ajout de NPK; C : ajout de PNT; D : ajout de Phospho-compost, E : ajout de SPS.

4.3.3. Effet des fumures organo-minérales et du niébé sur la nutrition azotée du mil

Les traitements B(NPK) et C (PNT) ont montré une meilleure utilisation ($P < 0,05$) de l'azote (respectivement 17,6 et 19 kg N ha⁻¹) par rapport au traitement D (Phospho-compost) (12,3 kg N ha⁻¹) (Figure 19). La capacité des plantes à prélever l'azote du sol est également significativement plus élevée avec des Ndfs (*Nitrogen derived from soil*) de 14,53 et 13,72 kg N ha⁻¹ pour B(NPK) et C (PNT), contre 9,59 kg N ha⁻¹ pour le traitement D (Phospho-compost). Aucune différence significative n'a été observée avec le coefficient réel de l'utilisation de l'azote, qui est de 12,06% pour B (NPK), 8,5% pour C (PNT), et 7,79% pour D (Phospho-compost).

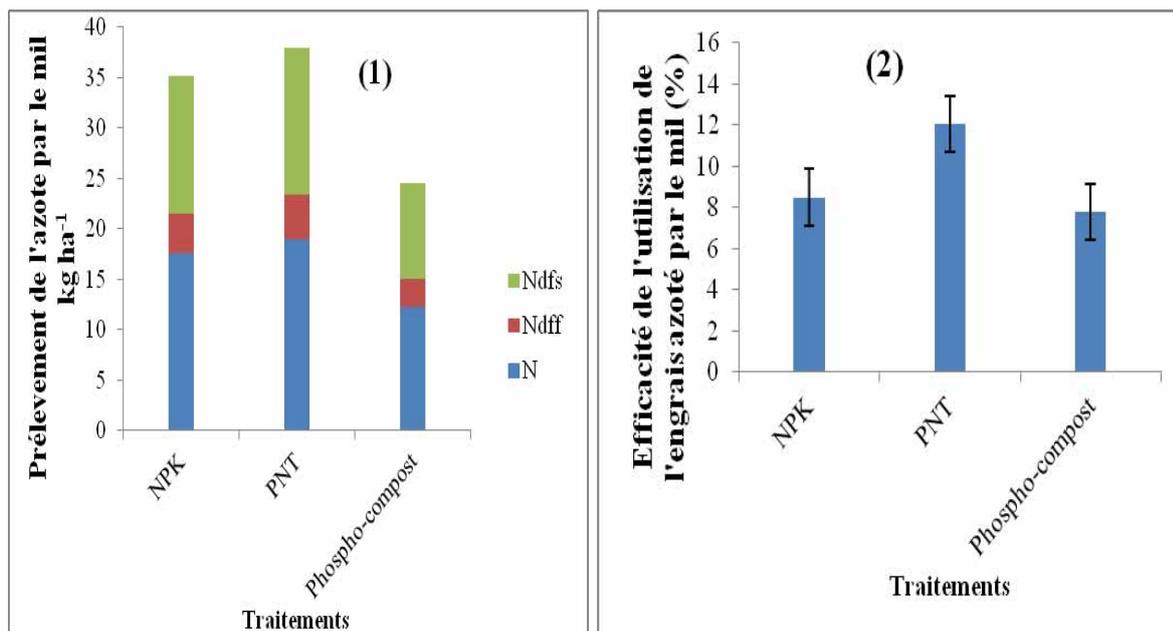


Figure 19 : Variation du prélèvement de l'azote (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des modes de gestion de la fertilité du sol.

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

4.3.4. Effet des systèmes de cultures sur la nutrition azotée du mil

La rotation niébé-mil a permis une meilleure absorption de l'azote total et un meilleur prélèvement de l'azote du sol ne provenant pas de l'engrais minéral. En effet, la quantité totale d'azote absorbée par le mil en rotation a été de 22,3 kg N ha⁻¹ contre 15,2 et 11,3 kg N ha⁻¹ respectivement pour la culture continue du mil et le mil en association (Figure 20). Pour ce qui est du prélèvement de l'azote ne provenant pas de l'engrais minéral, la rotation a permis le prélèvement de 17,55 kg N ha⁻¹ contre 10,96 kg ha⁻¹ pour le mil en culture pure et 9,34 pour le mil en association. Le coefficient réel de l'utilisation de l'azote a été de 12,83 %, 10,45 % et 5,06%, respectivement pour la rotation, la culture continue et l'association culturale.

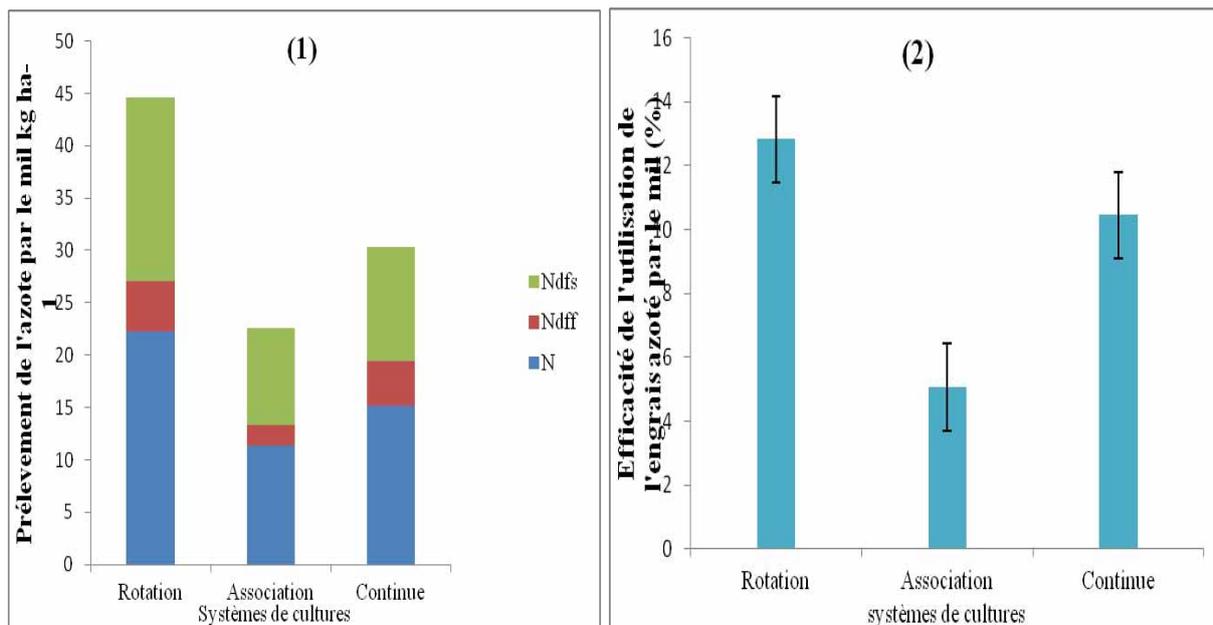


Figure 20: Variation du prélèvement de l'azote par le mil (1) et efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté (2) par le mil en fonction des systèmes de cultures.

N : quantité total de l'azote absorbée par la plante, Ndff : quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs : quantité de N provenant du sol.

4.4. Discussion

4.4.1. Effet des fumures sur les rendements du mil

Comparativement au niveau d'intensification témoin (A), toutes les technologies (fortes et moyennes), ont eu un effet très significatif sur les rendements du mil, mettant ainsi en évidence l'effet positif de l'utilisation des engrais sur l'augmentation des rendements des céréales. Bien que les rendements ne soient pas très élevés à cause de la fertilité très faible du sol, l'accroissement du rendement par rapport au témoin était de 299, 295, 152 et 116% respectivement pour les traitements E (SPS), B (NPK), C (PNT), D (Phospho-compost). Ces résultats mettent également en évidence l'effet positif du phosphore et du compostage de la matière organique (PNT et Phospho-compost, PC) dans l'amélioration de la disponibilité des nutriments pour les plantes (Bationo *et al.*, 2003 ; Zapata et Roy, 2004).

Le Super Phosphate Simple (SPS), engrais phosphaté soluble, utilisé à 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ dans la technologie forte, avec 50 kg N ha⁻¹ et une densité de semis de 1 m x 0,5 m, a donné les meilleurs rendements avec un accroissement des rendements de 299 % pour les grains, et 258 % pour la paille. Toutefois, cette technologie de SPS ne s'est pas traduite par

des résultats significativement différents de ceux obtenus avec la technologie moyenne de NPK apporté au poquet, qui a induit une augmentation de 295 % pour le rendement en grains, et 241 % pour la paille. Le SPS a été appliqué par poquet car l'efficacité de l'utilisation des engrais par la plante dépend du mode d'application, et l'apport par poquet est le plus efficace (Bationo et Waswa, 2011). Cependant, l'application du SPS au poquet s'est traduite par un effet dépressif sur le développement végétatif des plantes, ce qui a dû affecter son rendement.

L'apport de la micro-dose de NPK (6 g de NPK apportés au poquet au semis) et de 30 kg N ha⁻¹ (appliqués en deux fractions) a donné aussi un résultat positif. Cette technologie (Technologie B ou Moyenne 1) a induit une augmentation de rendements du mil et du sorgho de plus de 120 % au Burkina-Faso, au Mali et au Niger (Tabo *et al.*, 2011). La performance de micro-dose de NPK, réside dans le fait que cet apport au semis donne un coup de *starter* à la plante. Il assure un bon développement racinaire, permettant une utilisation efficace de l'eau et des éléments nutritifs. Ceci se traduit par une croissance rapide de la plante, la mettant ainsi à l'abri des stress hydriques de début et de fin de saison. Cette stratégie d'application de l'engrais au poquet est une opportunité pour les paysans ; le coût de l'investissement en fertilisant minéral est en effet plus faible, et elle permet une augmentation sensible des rendements des céréales (Bationo *et al.*, 2003 ; Tabo *et al.*, 2011).

L'apport du Phosphate Naturel de Tahoua (PNT) a induit également un accroissement significatif des rendements du mil, de 152 et 153% respectivement pour les grains et la paille. Le développement d'une approche intégrée de gestion des éléments nutritifs dans l'agriculture des pays en voie de développement, implique l'utilisation d'engrais minéraux et de sources naturelles d'éléments nutritifs, tels que les phosphates naturels (PN) (Zapata et Roy, 2004). Comme les PN sont des matériaux relativement insolubles, la dimension des particules a une importance considérable sur leur taux de solubilisation dans le sol. Plus la dimension des particules est petite, plus grand est le degré de contact entre le PN et le sol et, en conséquence, plus fort est son taux de dissolution. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de particules par unité de poids de PN appliqué, améliore les chances pour les poils absorbants de les rencontrer. Ainsi, l'application de PN finement broyés augmente le taux de sa dissolution et l'absorption du phosphore dans le sol. Cependant, en raison de leur nature pulvérulente, l'application de matériaux finement broyés est source de difficultés pratiques. En Afrique

occidentale, les agriculteurs se sont plaints d'avoir reçu en épandant le PN finement broyé, du produit dans les yeux et ils ont ressenti une sensation de brûlure (Zapata et Roy, 2004). En outre, il est difficile quand il vente, d'appliquer uniformément les doses recommandées, particulièrement si cela se fait à la volée. Pour réduire la contrainte liée à l'aspect pulvérulent, le PNT a été appliqué au poquet. Le PNT fait partie des PN reconnus aptes pour une application directe en agronomie (Bationo *et al.*, 2011). Il a été trouvé que l'efficacité agronomique de l'utilisation du PNT sur le rendement de mil était de 76% par rapport à celle du Super Phosphate Simple (SPS), tandis que celle du PN du parc du W, était de 48% (Bationo *et al.*, 2003). De nombreuses études ont été conduites ces dernières années sur l'utilisation des phosphates naturels en agronomie (AIEA, 2002; Bationo *et al.*, 2003 ; Zapata & Roy, 2004 ; Bonzi *et al.*, 2011 ; CORAF Action, 2011 ; Saidou *et al.*, 2011). Des expérimentations sur l'application localisée de PN et à la volée, associée au P soluble, ont été conduites dans plusieurs pays (Burkina Faso, Mali, Niger et Sénégal), et des résultats prometteurs ont été obtenus (Bonzi *et al.*, 2011).

L'apport du Phospho-compost a aussi conduit à des résultats significativement différents du témoin. Le traitement des PN avec des matériaux organiques et leur compostage, pourrait être une technique prometteuse pour augmenter la solubilité des PN et la disponibilité de P pour les plantes (Zapata et Roy, 2004 ; Lompo *et al.*, 2009). Les produits compostés avec des PN sont habituellement désignés sous le nom de phospho-composts (Zapata et Roy, 2004). Cette technologie de phospho-compost a permis d'obtenir une augmentation de 116 % pour le rendement en grains, et 123 % pour le rendement en paille. Le compostage de la matière organique est un procédé qui permet de valoriser les résidus de récolte et le fumier, en mettant à la disposition de la plante des éléments nutritifs facilement assimilables. Le PNT a été ajouté au compost lors de sa préparation, car l'incorporation des PN et de l'azote pendant le compostage permettrait d'améliorer la qualité et la biodégradation des composts (Lompo *et al.*, 2009 ; Bonzi *et al.*, 2011). Les rendements obtenus sont relativement faibles, mais auraient dû être plus élevés. En effet, les travaux de Lompo (1993) ont montré que la production de matière sèche et la quantité de phosphore exportée par le mil, sont améliorées en présence de phospho-composts. Dans le cas de la présente étude, la durée de compostage relativement courte (moins de deux mois), n'a pas permis à la paille de mil de bien se décomposer, et cela a dû être une contrainte dans l'expression du potentiel de cette

technologie. Il faut toutefois signaler qu'il y a eu très peu de travaux publiés sur l'efficacité agronomique des phospho-composts.

4.4.2. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du mil

Le rendement du mil subséquent à une culture de niébé, a présenté une différence significative par rapport aux rendements du mil en culture continue. L'effet positif de la rotation a été observé au niveau de tous les traitements (Tableau IX) ; le PNT a tendance à donner le meilleur résultat, mettant ainsi en évidence le rôle du phosphore dans les rotations légumineuses-céréales. La faible réponse du traitement E (Technologie forte), est probablement due à l'effet dépressif observé sur la végétation, suite à l'application du SPS au poquet (Tableau IX). L'effet bénéfique de la rotation légumineuse-céréale sur les rendements de la céréale, a été rapporté par plusieurs auteurs (Subbarao *et al.*, 2000 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2006 ; Bationo *et al.*, 2011; Omae *et al.*, 2014). Les légumineuses ont un potentiel d'amélioration durable de la productivité dans les systèmes de cultures, spécialement dans les pays en développement où la productivité agricole est en baisse (Nandwa *et al.*, 2011). L'impact positif de la légumineuse sur le rendement de la céréale subséquente est souvent attribué à la fixation de l'azote, à l'azote économisé sous la culture de la légumineuse, et à la libération de l'azote qui provient de la décomposition des résidus de la légumineuse (Bado, 2002). Il a été suggéré que des facteurs autres que la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique peuvent être responsables des effets résiduels élevés des légumineuses, car ces derniers ne peuvent pas être compensés par l'apport des engrais azotés (Bationo *et al.*, 2002 ; Bationo *et al.*, 2011). Les autres avantages des légumineuses qui ont été évoqués sont l'amélioration des propriétés biologiques et physiques du sol, la solubilisation des composés phosphatés non disponibles par les exsudations racinaires des légumineuses, la conservation et la restauration de la matière organique, et le contrôle des maladies (Bationo *et al.*, 2002 ; Carsky *et al.*, 2002).

L'association céréales-légumineuses est la pratique la plus courante en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale, où le niébé est le plus souvent cultivé avec le mil ou le sorgho (Bationo *et al.*, 2011 ; Omae *et al.*, 2014). L'association des cultures couvre plus de 75 % des terres cultivées dans les zones Soudano-Sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest, et la stabilité de la production en année pluvieuse ou pas, constitue son avantage majeur (Bationo *et al.*, 2003).

Par ailleurs, l'utilisation efficace des ressources du milieu, la minimisation des risques d'échec de production, l'amélioration de la fertilité du sol et sa protection, constituent les principales raisons pour lesquelles l'association des cultures est pratiquée. Il a été rapporté que l'association des cultures est plus productive que les cultures correspondantes en pur et que la culture intercalaire maïs-légumineuse a un potentiel de réduction du risque de l'échec, d'amélioration de la productivité et des revenus, et d'augmentation de la sécurité alimentaire dans les systèmes de production vulnérables (Rusinamhodzi *et al.*, 2012). De ce fait, il a été suggéré que ce système de culture peut être une voie vers l'intensification écologique (Rusinamhodzi *et al.*, 2012). D'autres études ont montré que la productivité dans ce système peut être améliorée en utilisant des variétés améliorées, des dates appropriées de semis, des densités de semis élevées, une fertilité améliorée des sols et des arrangements spatiaux appropriés (Olufajo et Singh, 2002 ; Woomer *et al.*, 2004). Ainsi, il a été rapporté que les arrangements de deux rangées de céréales avec deux rangées de niébé, ou deux rangées de céréales avec quatre rangées de niébé, seraient mieux indiqués que la pratique traditionnelle d'une rangée de céréale avec une rangée de niébé appliquée ici (Olufajo et Singh, 2002 ; Woomer et Tungani, 2003). Le land équivalent Ratio (LER) permet de rendre compte de l'efficacité de l'utilisation de la terre. Dans la présente étude, toutes les valeurs du LER, à l'exception de celle du traitement sans application de fertilisants, sont supérieures à 1, indiquant l'efficacité de l'association (Tableau X). Ainsi, la culture intercalaire, au niveau de la moyenne des traitements, a donné un avantage de 46 % par rapport aux cultures en pur. Un LER de 1,67 a été obtenu pour la pratique traditionnelle, et un autre de 2,05 pour l'arrangement en deux rangées de chacune des cultures (Woomer et Tungani, 2004). Des LER qui varient de 1,1 à 2,4 et de 1,0 à 1,9 ont été rapportés selon les arrangements spatiaux (Rusinamhodzi *et al.*, 2012). Toutes ces études indiquent des LER supérieurs à 1, prouvant ainsi qu'il est plus avantageux, pour peu qu'un seuil minimum de fertilité du sol soit atteint, de pratiquer l'association céréale-légumineuse par rapport à la monoculture. Le traitement avec le SPS pour lequel la densité de semis est la plus forte (1 m x 0,5 m), a présenté le LER le plus élevé (1,52). Il a été souligné que l'efficacité de l'association céréale-légumineuse augmente avec la densité de semis, pour peu que le niveau de fertilité du sol soit suffisant (Olufajo et Singh, 2002).

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

Les taux de prélèvement de l'azote par le mil avec les traitements B (NPK), C (PNT) et D (Phospho-compost), ont été relativement faibles dans ce sol sableux, lessivé et à très faible teneur en matière organique. Le traitement avec le PNT a enregistré le taux le plus élevé d'absorption de l'azote (19 kg N ha^{-1}), suivi du NPK ($17,6 \text{ kg N ha}^{-1}$), mettant ainsi en évidence le rôle que joue le phosphore sur le bon développement des racines permettant alors une meilleure absorption des éléments nutritifs (Bationo *et al.*, 2002). Le taux de prélèvement de l'azote du Phospho-compost (PC) ($12,3 \text{ kg ha}^{-1}$) est relativement faible, mais cela peut s'expliquer par la durée relativement courte (deux mois) de préparation du PC. Malgré l'ajout de PNT au moment de la préparation (ce qui est reconnu pour avoir un effet positif sur la décomposition), il n'y a pas eu amélioration de la décomposition de la paille de mil. Le PNT et le NPK ont ainsi induit un meilleur prélèvement de l'azote du sol que le PC. Cependant, il n'y a pas eu de différence significative entre les traitements par rapport au coefficient réel de l'utilisation de l'azote. Il a été indiqué que les plus faibles valeurs de recouvrement de l'azote ont été trouvées en Afrique à cause des facteurs limitants de croissance comme le manque d'eau, l'acidité du sol et la déficience en éléments nutritifs (Cleemput *et al.*, 2008). Des études ont également montré que le taux de recouvrement de l'azote est faible à cause des pertes importantes par volatilisation (Bonzi, 2002 ; Guillaume *et al.*, 2011 ; Miao *et al.*, 2011). Les taux de prélèvement de l'azote trouvés dans les systèmes de cultures que nous avons comparés, sont aussi relativement bas. Le mil en rotation a conduit à une meilleure absorption de l'azote provenant de l'engrais minéral et à un meilleur prélèvement de l'azote du sol, que la culture continue du mil (Omae *et al.*, 2014). Le précédent niébé a significativement amélioré le taux d'absorption et de prélèvement de l'azote du sol par le mil, et ce, quel que soit le traitement. Le traitement avec le PNT a induit le meilleur bilan azoté dans les systèmes de cultures.

4.4.4. Conclusion partielle

Les différents modes de gestion de la fertilité se sont tous avérés plus productifs que la pratique traditionnelle. Les technologies B, C, D dites moyennes car utilisant de faibles quantités d'engrais et valorisant les sources naturelles d'éléments nutritifs, avec une densité de semis relativement élevée, ont donné des rendements appréciables. En tenant compte de

tous ces aspects, ces technologies pourraient être abordables pour les paysans. L'application de PNT au poquet après le sarclage, peut être une technologie prometteuse pour l'utilisation des PN, car elle permet de réduire la contrainte liée à leur aspect pulvérulent. Le Land équivalent ratio (LER) enregistré avec les technologies testées, est supérieur à 1, indiquant que celles-ci permettent donc une utilisation efficace de la terre. La rotation niébé-mil associée à ces technologies a entraîné davantage l'accroissement des rendements du mil, et l'utilisation de la méthode isotopique de ^{15}N a permis de mettre en évidence le rôle important que joue la rotation avec les légumineuses dans les systèmes de cultures céréales-légumineuses. Ces modes de gestion de la fertilité des sols associés aux systèmes de culture à base de légumineuses, permettent une utilisation rationnelle de la terre et une meilleure mobilisation de l'azote du sol. Elles pourraient être recommandées comme modes de gestion intégrée de la fertilité des sols aux paysans.

Chapitre V : Evaluation de la fixation biologique de l'azote et du rôle du phosphore dans la production du niébé.

5.1. Introduction

Les légumineuses jouent un rôle important dans la contribution à la sécurité alimentaire, la génération des revenus et le maintien de l'environnement chez la plupart des producteurs des régions de l'Afrique sub-saharienne (Tarawali *et al.*, 2002 ; Nandwa *et al.*, 2011 ; Saidou *et al.*, 2011). Elles constituent une importante source d'aliment aussi bien pour les humains que pour le bétail auxquels elles procurent les besoins essentiels en protéines, sels minéraux, fibres et vitamines, et génèrent des revenus par la vente des graines et du fourrage. Par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, elles jouent un rôle important dans la gestion de la fertilité du sol. Toutes ces vertus font que les légumineuses, en particulier le niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp.), sont largement cultivées en zones semi-arides des tropiques. La production annuelle mondiale du niébé est estimée à 6,4 millions de tonnes, produites sur 12,7 millions d'hectares environ (Sanginga et Bergvinson, 2015) ; il a été estimé que les 8 millions d'hectares proviennent de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (Odendo *et al.*, 2011). L'Afrique subsaharienne (ASS) représente environ 95 % de cette production et l'Afrique de l'Ouest produit plus de 80 %, Le Nigeria est le plus grand producteur avec 50 % de la production mondiale du niébé, suivi par le Niger et le Burkina-Faso (Sanginga et Bergvinson, 2015). Les principaux pays producteurs du niébé sont le Nigéria, le Niger, le Sénégal, le Ghana, le Mali et le Burkina Faso (Coulibaly et Lowenberg-DeBoer, 2002). . Le Nigeria et le Niger comptent à eux seuls pour 87 % de la récolte mondiale (Odendo *et al.*, 2011). Le Nigeria est le plus grand producteur et consommateur (Coulibaly et Lowenberg-Deboer, 2002 ; Odendo *et al.*, 2011 ;) et le Niger est le principal exportateur en Afrique de l'Ouest (Lambot, 2002). La moyenne du surplus exportable a été estimée à 620 132 tonnes (MDA, 2010). En effet, au Niger, le niébé constitue le 2^{ème} produit agricole exporté avec 27 % de la valeur totale des produits agricoles exportés après l'oignon (58 %) (MDA/MRA, 2008). Il représente de ce fait l'une des principales sources de revenu monétaire en milieu rural. Sa production a été estimée à 1 548 103 tonnes en 2008. Il constitue la légumineuse la plus cultivée avec 98,3 % des superficies occupées par les légumineuses.

Les légumineuses sont le plus souvent cultivées en association avec les céréales dans la plupart de régions de l'Afrique sub-saharienne (Odendo *et al.*, 2011). Au Niger, le niébé est cultivé à 97,4 % en association avec d'autres cultures notamment le mil (MDA/MRA, 2008). Le rendement moyen du niébé au Niger est de 270 kg ha⁻¹ (MDA/DS, 2011), contre un rendement potentiel de 2 tha⁻¹ dans les stations de recherche et chez les gros producteurs du niébé en culture pure (Bationo *et al.*, 2002). Plusieurs contraintes dont les insectes ravageurs, les maladies et la faible fertilité des sols, en particulier la déficience en P, affectent la culture du niébé et limitent son rendement. L'importance du phosphore dans l'amélioration de la production du niébé et de la fixation biologique de l'azote a été évoquée par plusieurs auteurs (Subbarao *et al.*, 2000; Vanlauwe *et al.*, 2000 ; Bado, 2002 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2008 ; Nandwa *et al.*, 2011 ; Saidou *et al.*, 2011 ; Singh *et al.*, 2011; Mmbaga *et al.*, 2014 ; Mulambuila *et al.*, 2015). Ainsi, l'apport du phosphore est nécessaire pour une intensification de la production du niébé. Paradoxalement, la faible teneur presque généralisée en cet élément fait de lui le facteur limitant principal de la fertilité chimique de la grande majorité de sols tropicaux (AIEA, 2002 ; Bationo, *et al.*, 2003 ; Zapata et Roy, 2004 : Akandé *et al.*, 2005 ; Mahamane, 2008 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Bonzi *et al.*, 2011). Zapata et Roy (2004) ont rapporté que l'intensification de la production agricole en Afrique sub-saharienne passe nécessairement par l'apport de phosphore, non seulement pour augmenter la production agricole, mais également pour améliorer le niveau du P du sol afin d'éviter une dégradation supplémentaire. Cependant, l'utilisation d'engrais phosphatés solubles par les producteurs reste très faible. En effet, leur coût élevé les rend inaccessibles aux agriculteurs à ressources limitées. A titre illustratif, l'Afrique sub-saharienne n'utilise que 1,5 kg de P₂O₅ ha⁻¹, contre 20 et 34 pour l'Amérique latine et l'Asie respectivement (Zapata et Roy, 2004). Pourtant, plusieurs pays de cette région disposent de gisements de phosphates naturels (PN) (Johnson, 1995 ; Zapata et Roy, 2004 ; Mokwuneye et Bationo, 2011). Les ressources locales constituent un important facteur pour le développement d'une agriculture durable. Le Niger dispose de deux gisements de PN dont ceux de Tahoua, classés parmi les PN qui peuvent être utilisés pour une application directe au champ (Truong *et al.*, 1978 ; Bationo *et al.*, 1998 ; Bationo *et al.*, 2003 ; Natatou *et al.*, 2005). Leur utilisation peut améliorer le statut en P du sol avec leur effet immédiat et surtout résiduel qui est d'ailleurs mieux valorisé dans les systèmes de cultures. En effet, les racines de certaines légumineuses en association avec les mycorhizes peuvent sécréter des substances acides capables de solubiliser les formes très insolubles des composés phosphatés. Ces substances libèrent ainsi le P qui devient disponible

pour la plante (Bationo *et al.*, 2002, Dakora et Phillips, 2002 ; Mahamane, 2008). En outre, l'incorporation des PN dans la préparation du compost, en présence d'azote, permet d'améliorer la qualité du compost et de mieux valoriser l'utilisation des PN (Lompo, 1993 ; Thuita *et al.*, 2005 ; Akande *et al.*, 2005 ; Lompo *et al.*, 2009 ; Bonzi *et al.*, 2011).

Dans la présente étude, il s'est agi 1) de quantifier la fixation biologique de l'azote fixé sous différents modes de gestion de la fertilité de sol et 2) d'évaluer l'impact de différentes sources de P sur la production du niébé et la fixation de l'azote.

5.2. Matériels et Méthodes

5.2.1. Site de l'étude

Les expérimentations agronomiques ont été réalisées de 2011 à 2013 sur le site de Kalapaté, présenté au chapitre II. Pour le niébé, seules les données de 2013 ont pu être exploitées compte tenu des aléas climatiques évoqués plus haut.

5.2.2. Sols

Les sols appartiennent à la classe des lixisols (IUSS, 2014). Ils sont pauvres en azote, phosphore et carbone organique, et ont une capacité d'échange cationique faible. Ils sont très sableux et pauvres en éléments fins (Tableau I). Avant le début de l'expérimentation, les sols ont été caractérisés. Les analyses du sol ont été effectuées au laboratoire des sols de l'INRAN, selon les méthodes décrites au chapitre IV.

5.2.3. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué du Mil (*Pennisetum glaucum*) variété HKP (Haini kirey Précoce) et de quatre variétés de niébé (*Vigna unguiculata* (L). Walp.) : K VX 30-309-6G ; variété Locale Kalpaté ; TN5-78 et IT90K-372-1-2. Les caractéristiques de ces variétés ont été décrites en annexes 9,10,11 et 12.

5.2.4. Fumure

Les fumures sont identiques à celles appliquées au chapitre IV.

5.2.5. Plan de l'expérimentation et dispositif expérimental

Les traitements sont exactement les mêmes que ceux décrits au chapitre IV.

Le dispositif expérimental est un carré latin, en alternant les traitements D et E identique à la figure 17).

5.2.6. Evaluation de la fixation biologique de l'azote par le niébé

Afin d'évaluer la fixation biologique de l'azote, l'urée et le NPK ont été marqués à 22,5% de ^{15}N , et appliqués sur quatre poquets des micro-parcelles de niébé délimitées par des tôles, au niveau des technologies B (NPK), C (PNT) et D (Phospho-compost). Le mil a été considéré comme plante de référence et a reçu du NPK ou de l'urée marqués à 1% selon les traitements, également sur quatre poquets des micro-parcelles délimitées par les tôles. En ce qui concerne la technologie B, le NPK marqué à 2,25% a été apporté au semis en raison de 15 kg N ha⁻¹ sur les parcelles de niébé ; du NPK marqué à 1% a été appliqué en raison de 15 kg ha⁻¹ sur les parcelles de mil. Au niveau des technologies C (PNT) et D (Phospho-compost), l'urée marquée à 2,25% a été appliquée sur le niébé au démarrage au taux de 15 kg N ha⁻¹ ; de l'urée marquée à 1% a également été appliquée au taux de 30 kg ha⁻¹ sur le mil, en deux apports au tallage et à la montaison.

a partie aérienne des poquets centraux des micro-parcelles de niébé et du mil, a été récoltée à la maturité physiologique. Les échantillons ont été traités de la même façon qu'au niveau du chapitre IV pour l'analyse isotopique. La quantification de l'azote issu du fertilisant ainsi que la quantité l'azote fixé ont été effectuée selon les équations suivantes (AIEA, 2001):

$$\text{Ndff}(\%) = \frac{\text{Excès isotopique en } ^{15}\text{N} \text{ dans la plante}}{\text{Excès isotopique en } ^{15}\text{N} \text{ dans l'engrais}} \times 100 \text{ (Equation 1)}$$

$$\text{N récolté venant de l'engrais} = \frac{\text{N de la récolte (kg ha}^{-1}) \times \text{Ndff (\%)}}{100} \text{ (Equation 2)}$$

$$\text{Utilisation du fertilisant} = \frac{\text{N récolté venant de l'engrais}}{\text{N venant de l'engrais}} \times 100 \text{ (Equation 3)}$$

$$\text{Ndfa (\%)} = 1 - \frac{\text{Ndff}_F\%}{\text{Ndff}_{NF}\%} \times 100 \text{ (Equation 4)}$$

Avec : Ndfa = l'azote qui dérive de l'atmosphère ; Ndff_F = l'azote de la plante fixatrice qui provient de l'engrais ; Ndff_{NF} = L'azote de la plante non fixatrice qui provient de l'engrais.

$$\text{Quantité de N}_2 \text{ fixé (kg ha}^{-1}) = \frac{\% \text{ Ndfa} \times \text{NF de la récolte (kg ha}^{-1})}{100} \text{ (Equation 5)}$$

A la récolte, les composantes du rendement ont été mesurées : les fanes et grains de niébé secs issus des différentes technologies ont été pesés.

5.2.7. Analyses statistiques

Les effets des fumures organo-minérales sur la production du niébé et les quantités de l'azote fixé, ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel Genstat version Discovery 4. Les données de 2011 et 2012 n'ayant pas pu être exploitées à cause de fléaux climatiques, seule la séparation des moyennes de 2013 a été effectuée par l'option contraste, et le test de Duncan au seuil de 5% .

5.3. Résultats

5.3.1. Effet des fumures sur les rendements du niébé

Les rendements en grains ont été de 98 kg ha⁻¹ pour le témoin, contre 73, 131, 137 et 259 kg ha⁻¹ respectivement pour les traitements E (SPS), C (PNT), B (NPK) et D (phospho-compost) (Tableau XI). Les traitements C (PNT) et B (NPK) sont également statistiquement identiques au témoin. Seul le traitement D (phospho-compost) diffère significativement du

témoin, sans pour autant être statistiquement différent du traitement B (NPK). Le traitement D (phospho-compost) présente un accroissement de rendement de 164 % par rapport à celui du témoin (Tableau XI). Les rendements en fanes des traitements E (SPS), A (Témoin), C (PNT) et B (NPK) sont statistiquement identiques. Le traitement D (phospho-compost) est significativement différent des traitements E (SPS), A (Témoin), C (PNT), mais n'est pas statistiquement différent de B (NPK) (Tableau XII). Le traitement D (phospho-compost) présente un accroissement de rendement en fane de 106 % comparativement au témoin.

Tableau XI : Variation du rendement en graine de niébé en fonction des technologies sur le site de Kalapaté.

Traitements	Rendement en grain de niébé kg ha ⁻¹	Accroissement (%)
A (Témoin)	98cb	100
E (SPS)	73c	74
C (PNT)	131 cb	134
B (NPK)	137ba	140
D (Phospho-compost)	259a	264
Signification ¹	**	
CV%	36	

A : Témoin ; B : ajout de NPK ; C : ajout de PNT ; D : ajout de Phospho-compost, E : ajout de SPS

¹ Signification statistique : ** significatif au seuil de probabilité de $p < 0,01$.

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

CV : Coefficient de variation

Tableau XII : Variation du rendement en fane de niébé en fonction des technologies sur le site de Kalapaté.

Traitements	Rendement en fane de niébé kg ha ⁻¹	Accroissement (%)
A (Témoin)	202b	100
E (SPS)	185b	92
C (PNT)	245b	121
B (NPK)	297ba	147
D (Phospho-compost)	415a	206
Signification ¹	**	
CV%	48	

A : Témoin ; B : ajout de NPK ; C : ajout de PNT ; D : ajout de Phospho-compost, E : ajout de SPS

¹ Signification statistique : ** significatif au seuil de probabilité de $p < 0,01$.

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

CV : Coefficient de variation

5.3.2. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du niébé

Les rendements en graines et fanes de la culture pure en continu et en rotation, sont significativement différents de ceux de la culture du niébé en association. Le rendement en graines de la culture associée est de 67 kg ha⁻¹ contre 164 et 188 kg ha⁻¹ respectivement pour la culture continue et la culture en rotation. Les rendements en fanes de la culture pure en continu et en rotation, sont respectivement de 265 et 346 kg ha⁻¹, contre 197 kg ha⁻¹ pour le rendement en fanes de la culture associée (Tableau XIII).

Tableau XIII : Variation de la production du niébé en fonction des systèmes de cultures.

Système de Cultures	Rendement en grains de niébé (kg ha ⁻¹)	Rendement en fane (kg ha ⁻¹)
Association	67b	197b
Continue	164a	265ba
Rotation	188a	346a
Signification ¹	**	**
CV%	36	48

1 : Signification statistique : ** significatif au seuil de probabilité de p<0,05 .

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

5.3.3. Effet des fumures organo-minérales sur la nutrition azotée du niébé et la fixation biologique

L'effet des traitements C (PNT) et D (Phospho-compost) a été évalué sur la nutrition azotée du niébé. Les conditions particulièrement difficiles de germination du niébé ont beaucoup affecté le traitement B (NPK), et n'ont pas permis l'exploitation des données. Au niveau du traitement B avec la micro-dose de NPK, l'azote marqué a été apporté au moment du semis, du fait des ré-semis effectués, l'interprétation des données pose problème. Le traitement D (Phospho-compost) a montré une meilleure utilisation de l'azote (P< 0,05) comparativement au traitement C (PNT) : 15,9 kg N ha⁻¹ contre 10,1 kg N ha⁻¹ (Figure 21). La capacité du niébé à prélever l'azote du sol et de l'engrais, ne présente pas de différence significative pour les deux traitements. Au niveau de la technologie D (Phospho-compost), 6,7 kg N ha⁻¹ soit 40,8 % des besoins en azote du niébé, proviennent de l'atmosphère, ce qui diffère statistiquement des 22,4 % de l'azote fixé avec le traitement C (PNT).

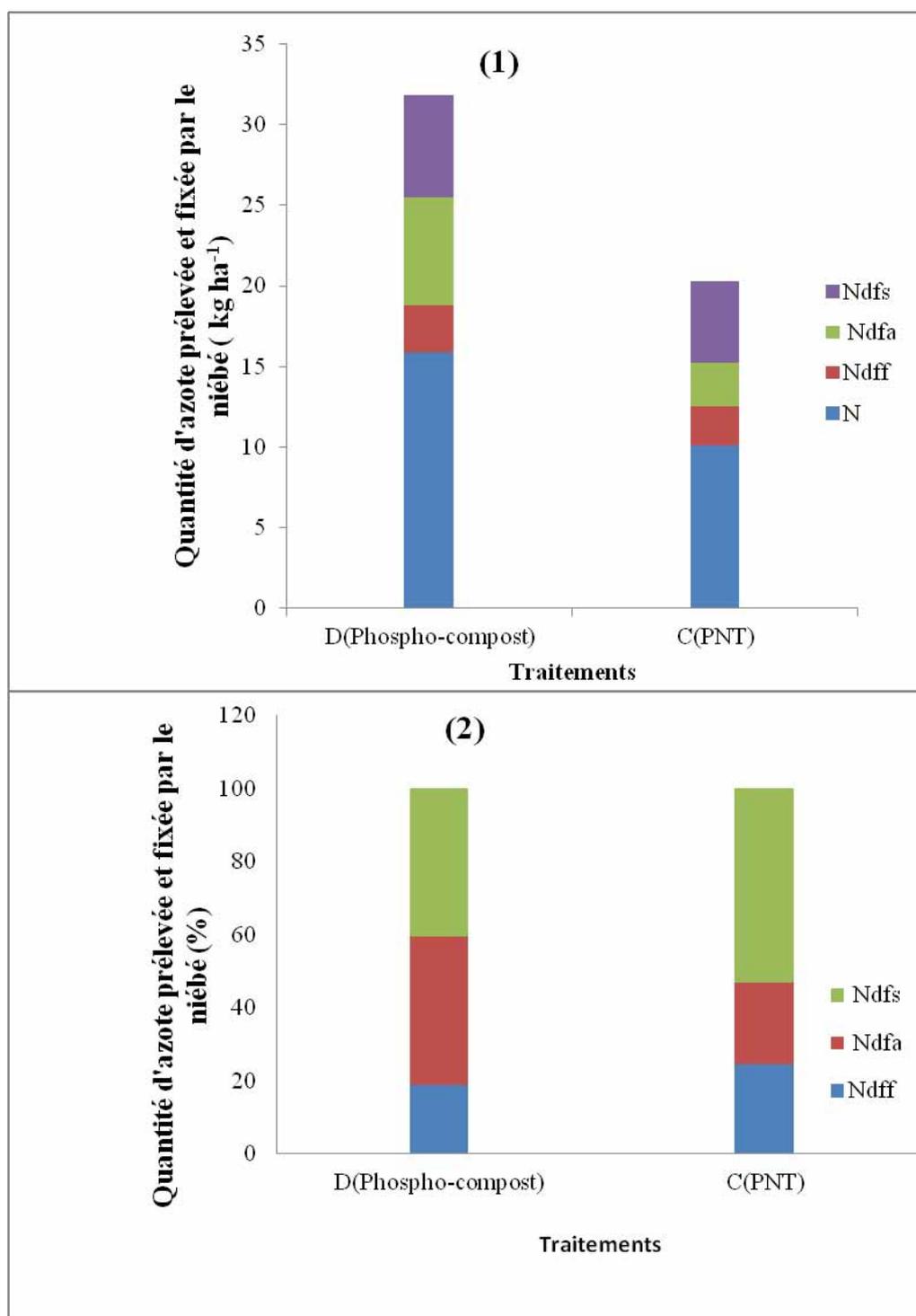


Figure 21 : Variation du prélèvement de N et de la fixation de l'azote en kg ha⁻¹(1) et en % (2) par le niébé en fonction des traitements en 2013.

N : quantité total de l'azote absorbée par la plante, Ndff : quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs : quantité de N provenant du sol, Ndfa : quantité de N provenant de l'atmosphère.

5.3.4. Effet des systèmes de cultures sur la nutrition azotée du niébé et la fixation biologique

La quantité d'azote total absorbée par le niébé en continu et par le niébé en rotation est respectivement $15,6 \text{ kg ha}^{-1}$ et $14,1 \text{ kg ha}^{-1}$. Ces valeurs sont significativement différentes de celle du niébé en association qui est de $9,3 \text{ kg ha}^{-1}$. Les quantités d'azote provenant du sol du niébé en continu et du niébé en rotation ($6,1$ et $7,5$) sont significativement différentes de celle du niébé en association. Cependant il n'y a pas de différence significative au niveau de Ndfa kg ha^{-1} et de Ndfa (%) entre les systèmes de cultures (Figure 22).

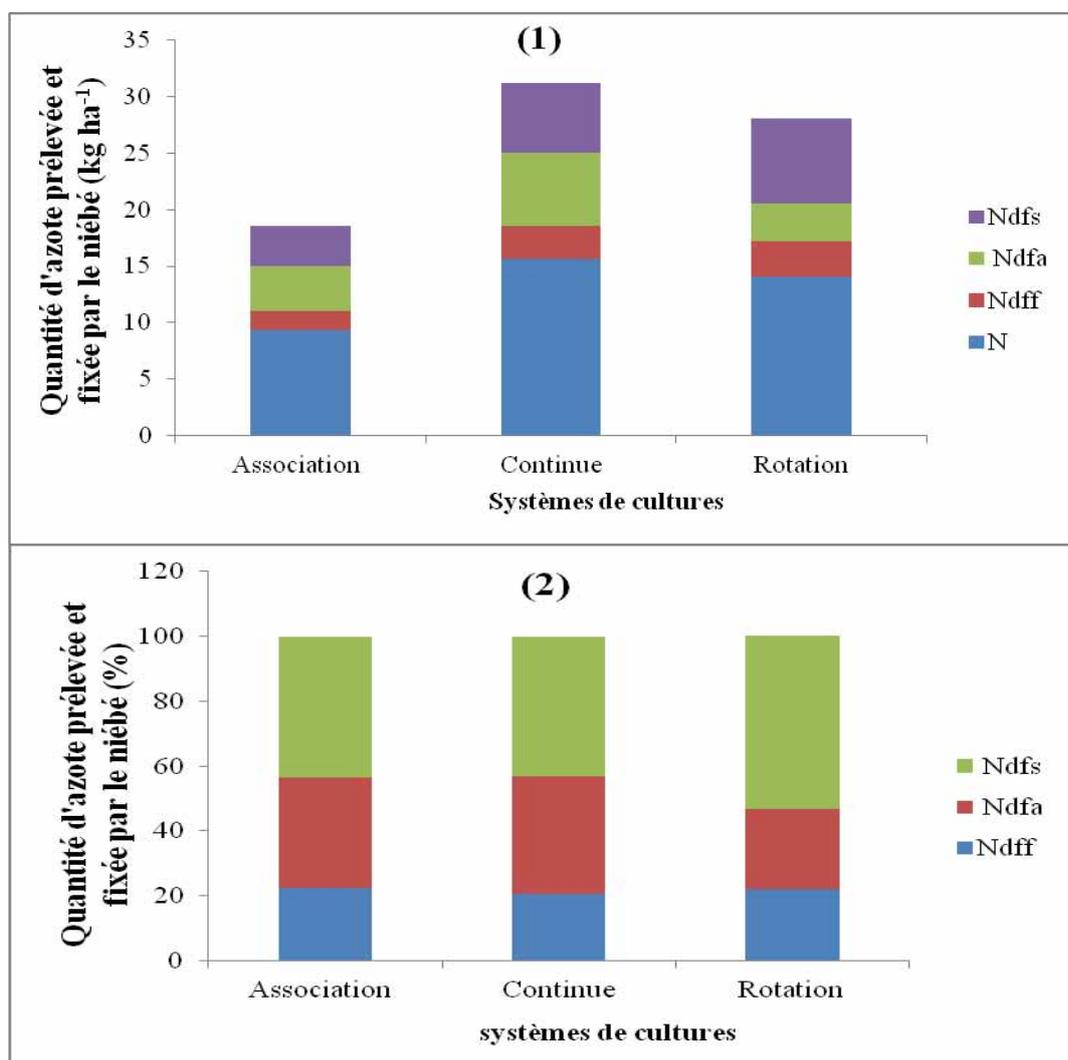


Figure 22: Variation du prélèvement de N et de la fixation de l'azote en kg ha^{-1} (1) en % (2) par le niébé en fonction des systèmes de cultures en 2013.

N : quantité total de l'azote absorbée par la plante, Ndff : quantité de N provenant de l'engrais, Ndfs : quantité de N provenant du sol, Ndfa : quantité de N provenant de l'atmosphère.

5.4. Discussion

5.4.1. Effet des fumures sur les rendements du niébé

Les rendements du niébé ont été très faibles à cause de l'excès d'humidité pendant la période du semis, entraînant ainsi une mauvaise germination et nécessitant plusieurs ré-semis. En effet, l'excès d'humidité nuit au développement du niébé (Laouali, 2004 ; Garba, 2007). Cet aspect a négativement influencé les rendements du niébé au niveau de tous les traitements. Le rendement du traitement E est très faible, car en plus de la mauvaise germination, l'application au poquet du Super Phosphate Simple (SPS) a entraîné un effet dépressif sur la végétation.

Néanmoins, en dépit du cas particulier du traitement avec le SPS, les autres sources de phosphore ont induit une amélioration des rendements, mettant ainsi en évidence le rôle que joue le phosphore dans la production des légumineuses et particulièrement celle du niébé. L'effet du phosphore sur la production du niébé a été rapporté par de nombreux auteurs (Vanlauwe *et al.*, 2000 ; Bado, 2002 ; Jemo *et al.*, 2006 ; Magani et Kuchind, 2009 ; Saidou *et al.*, 2011 ; Singh *et al.*, 2011 ; Nyoki et Ndakidemi, 2014 ; Mulambuila *et al.*, 2015). Bationo *et al.* (2002) ont rapporté que dans les pays semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, les teneurs en P total et P assimilable sont très faibles ; la déficience en P est le facteur le plus limitant pour la production du niébé, et l'application d'engrais phosphatés peut tripler sa production. Selon Akande *et al.* (2010), l'application des phosphates a significativement amélioré la biomasse du maïs et du niébé. L'accroissement des rendements du niébé par l'application de P, réside dans le fait qu'il améliore la croissance des racines, qui arrivent alors à explorer un volume important du sol favorisant ainsi l'absorption des autres éléments. Fisher *et al.* (2002) ont rapporté que le phosphore augmente la durée de vie des racines des légumineuses, et aide ainsi à fournir le budget de carbone de la plante et des conditions favorables à l'absorption des nutriments et donc, à l'augmentation des rendements en grains. Le phosphore stimule la croissance des racines et de la plante, initie la formation des nodules et influence l'efficacité de la symbiose rhizobium- légumineuse (Bationo *et al.*, 2002). Il a été aussi rapporté que l'apport du phosphore permet d'améliorer l'efficacité de la fixation de l'azote, ce qui se traduit par une augmentation de la production du niébé (Jemo *et al.*, 2006 ; Bado *et al.*, 2008 ; Magani et Kuchinda, 2009 ; Saidou *et al.*, 2011 ; Singh *et al.*, 2011).

Donald (1999) a rapporté que les Rhizobiums utilisent le P comme un élément essentiel pour convertir l'azote atmosphérique N_2 en ammonium (NH_4), qui est la forme utilisée par les plantes.

5.4.2. Effet du phosphate naturel de Tahoua (PNT) sur la production du niébé

L'application du PNT (Traitement C) s'est traduite par un accroissement de 34 % et 21 %, respectivement pour le rendement en grains et en fanes de niébé. Bielders (1998) a obtenu une augmentation de rendement du niébé de 27 %, suite à l'application du phosphate naturel de Tahoua (PNT). Il a trouvé que l'apport de PNT permet d'accroître la matière sèche du niébé entre 12 et 46 %. Au Sahel, les sols sont très pauvres en phosphore et les engrais phosphatés solubles manufacturés sont généralement recommandés pour corriger cette insuffisance. Du fait du coût élevé des engrais phosphatés conventionnels, un intérêt considérable a été porté ces dernières années sur l'utilisation des phosphates naturels (Bationo *et al.*, 2002 ; AIEA, 2002 ; Akandé *et al.*, 2005 ; Akandé *et al.*, 2010 ; Bonzi *et al.*, 2011 ; CORAF, 2011 ; Saidou *et al.*, 2011 ; Husnain *et al.*, 2014). La plupart des pays en voie de développement disposent d'importants gisements de phosphates naturels dont la valorisation pourrait contribuer à résoudre les problèmes de carence en phosphore des sols (Zapata et Roy, 2004 ; Bationo et Waswa, 2011 ; Mkwuneye et Bationo, 2011). Bationo *et al.* (2002) ont rapporté que l'application directe des PN peut constituer pour la production du niébé dans la région, une alternative économique à l'utilisation des coûteux engrais phosphatés importés. L'application directe des PN après pulvérisation, est parmi les moyens les moins onéreux de fournir du phosphore aux cultures dans les sols tropicaux acides. Akande *et al.* (2010) ont montré que les roches phosphatées d'Ogun et Crystallizer, peuvent aussi être efficaces pour augmenter les rendements en matière sèche de maïs et de niébé, comme le super phosphate simple. Bationo *et al.* (2003) ont également montré que l'efficacité agronomique de l'utilisation du PNT sur le rendement de mil, était de 76 % par rapport à celle du Super Phosphate Simple (SPS).

5.4.3. Effet du phospho-compost sur la production du niébé

L'apport du phospho-compost (traitement D) a permis d'obtenir un accroissement de rendement par rapport au témoin, de 164 % et 106 % respectivement pour les grains et fanes de niébé. Le traitement des PN avec des matériaux organiques et leur compostage, est une technique prometteuse pour augmenter la solubilité des PN et la disponibilité du phosphore (P) pour les plantes (Lompo, 2003 ; Zapata et Roy, 2004 ; Akande *et al.*, 2005 ; Bonzi *et al.*, 2011 ; Makinde, 2013 ; Sharif *et al.*, 2013 ; Ali *et al.*, 2014). Pendant la décomposition des matériaux organiques, une activité microbienne intense se développe et se traduit par une production d'acides organiques et humiques (Zapata et Roy, 2004 ; Bonzi *et al.*, 2011). L'augmentation de la libération de phosphore par les PN semble être une fonction de l'acidification du PN par les acides organiques, et surtout de leur capacité de chélation sur le calcium (Ca), le fer (Fe) et l'aluminium (Al). Le taux de solubilisation des PN pendant le compostage, dépend de la qualité et de la quantité des matériaux organiques (Zapata et Roy, 2004 ; Akande *et al.*, 2005 ; Thuita *et al.*, 2005).

De nombreuses études ont montré l'effet positif de l'utilisation du phospho-compost sur l'augmentation des rendements des cultures (Akande *et al.*, 2005 ; Sharif *et al.*, 2013 ; Ali *et al.*, 2014). Les résultats suggèrent que l'utilisation de composts préparés à partir de différents matériaux organiques avec les PN, sont économiques, respectueux de l'environnement et ont un potentiel pour améliorer les rendements des cultures et l'absorption de N et P par la plante (Sharif *et al.*, 2013 ; Ali *et al.*, 2014).

L'application du phospho-compost ainsi que l'apport des PN avec des amendements organiques, permettent d'améliorer les rendements des cultures. Thuita *et al.* (2005) ont rapporté qu'il y avait des augmentations significatives des rendements de maïs et de soja, suite à l'application de PN en combinaison avec des matériaux organiques dans les sols acides de Siaya. Selon Makinde (2013), le rendement du gombo a significativement augmenté suite à la fortification des engrais organiques avec le phosphate naturel d'Ogun.

Une augmentation de la disponibilité de P à travers l'amendement des PN avec les matériaux organiques a été observée, et serait responsable de l'amélioration des rendements (Akande *et al.*, 2005 ; Thuita *et al.*, 2005). La dissolution du phosphore insoluble des PN par

les acides organiques des matériaux organiques, serait à l'origine de l'accroissement de la disponibilité du phosphore pour les plantes (Thuita *et al.*, 2005 ; Sharif *et al.*, 2013; Makinde, 2013 ; Ali *et al.*, 2014). Par ailleurs, Zapata et Roy (2004) ont rapporté que du fait de sa grande capacité d'échange cationique, la matière organique induit non seulement une plus grande capacité de rétention des sols pour le calcium, mais aussi la production d'acides organiques solubilisant le PN et bloquant des emplacements d'adsorption du phosphore sur le sol. Il s'en suit alors une meilleure dissolution du PN.

Une augmentation de l'efficacité agronomique du PN dans les phospho-composts par rapport au PN directement appliqué est prévisible, en raison de sa plus grande teneur en phosphore hydrosoluble et soluble dans l'acide citrique, phosphore qui serait disponible pour les plantes (Zapata et Roy, 2004). Dans ce sens, Akande *et al.* (2005) ont observé que l'efficacité agronomique des PN a été remarquablement améliorée par l'effet solubilisant de la fiente de volaille.

5.4.4. Effet des systèmes de cultures sur les rendements du niébé

Des rendements relativement faibles du niébé ont été aussi enregistrés au niveau des systèmes de cultures, compte tenu des raisons citées précédemment. La culture associée du niébé, qui correspond à la pratique courante du paysan, a donné le plus faible rendement avec 67 kg ha⁻¹ et 197 kg ha⁻¹, respectivement pour les rendements en graines et en fanes. De très faibles rendements du niébé caractérisent cette pratique paysanne. Olufajo et Singh (2002) ont rapporté que dans ces cultures associées, la production du niébé varie entre 0 et 132 kg ha⁻¹, comparée au rendement potentiel de 1500 à 3000 kg ha⁻¹ de la culture pure en gestion optimum. Selon Bationo *et al.* (2002), le rendement en graines du niébé se situe entre 50 et 300 kg ha⁻¹ dans les champs des paysans, contre plus de 2000 kg ha⁻¹ en culture pure dans les stations de recherche ou les grandes entreprises commerciales. Néanmoins, pour les raisons évoquées plus haut, les rendements de la culture du niébé en continu et en rotation sont aussi demeurés faibles.

5.4.5. Effet des fumures organo-minérales sur la nutrition azotée du niébé et la fixation biologique

Compte tenu des problèmes rencontrés, le traitement B (NPK) a été exclu de l'exploitation des données. Le traitement D (Phospho-compost) a induit la meilleure absorption de l'azote par le niébé, ainsi que le meilleur taux de fixation de l'azote atmosphérique par rapport au traitement C (PNT). Des études ont montré que le compostage de résidus culturaux en présence de PN, est une technologie qui permet d'augmenter la solubilité des PN et la disponibilité du phosphore pour les plantes (Lompo, 2003 ; Zapata et Roy, 2004 ; Akande *et al.*, 2005 ; Bonzi *et al.*, 2011 ; Makinde, 2013 ; Sharif *et al.*, 2013 ; Ali *et al.*, 2014). Une fois disponible pour la plante, le phosphore joue un rôle très important sur le développement racinaire, favorisant ainsi l'absorption des éléments nutritifs. Il a été rapporté que le phosphore présente un potentiel considérable sur l'amélioration des rendements du niébé et la fixation de l'azote (Donal, 1999). Le phosphore améliore en particulier la fixation symbiotique de l'azote (Bationo *et al.*, 2002 ; Jemo *et al.*, 2006 ; Bado *et al.*, 2008 ; Magani et Kuchinda, 2009 ; Singh *et al.*, 2011 ; Mmbaga, 2014) et beaucoup de travaux indiquent que son efficacité sur la fixation de l'azote réside dans sa capacité à augmenter la nodulation et l'activité de la symbiose (Donal, 1999 ; Bado, 2008).

Les problèmes de germination du niébé rencontrés et la faible fertilité du sol, ont probablement conduit à la fixation de faibles quantités d'azote. Une déficience en éléments nutritifs (P, S, Ca, Mo, Fe, etc.) peut diminuer le développement de la plante, des rhizobiums et l'activité symbiotique, d'où une faible fixation de l'azote (Fischer et Newton, 2002 ; O'Hara *et al.*, 2002 ; Bado, 2008).

L'effet du traitement D (Phospho compost) a permis au niébé de fixer 6,7 kg N ha⁻¹ contre 2,7 kg N ha⁻¹ pour le traitement C (PNT), correspondant respectivement à 41 et 22 % de leur besoin en azote. Le niébé fixerait environ 20 à 46 kg ha⁻¹ d'azote, correspondant à 37 à 67 % de ses besoins en azote, mais pouvait fixer des quantités d'azote plus élevées allant jusqu'à 50 à 75 % de ses besoins en azote (Bado 2008). Odendo (2011) a estimé que le niébé peut fixer entre 73 et 80 kg N ha⁻¹. Singh *et al.* (2011) ont rapporté que le niébé a fixé 240 kg ha⁻¹ d'azote, et contribue à enrichir les sols en mettant 60-70 kg N ha⁻¹ à la disposition de la céréale subséquente.

5.4.6. Effet des systèmes de cultures sur la fixation biologique et la nutrition azotée du niébé

Le niébé en association devait présenter un pourcentage d'azote fixé (% Ndfa) plus élevé, compte tenu de la compétition pour l'azote de la céréale. Néanmoins, le pourcentage d'azote fixé ne présente pas de différence significative par rapport aux systèmes de cultures (Figure 20). Jensen (2008) a rapporté que la légumineuse des cultures intercalaires obtient souvent une proportion plus élevée d'azote fixé par rapport à sa monoculture, parce que la céréale est plus compétitive pour l'azote du sol que la légumineuse. Le même auteur souligne cependant, que la quantité d'azote fixée par unité de surface pour la légumineuse en association est typiquement moindre, en raison d'autres interactions telles que la concurrence pour la lumière, l'eau et le phosphore entraînant ainsi une faible fixation. Tout comme le pourcentage de N fixé par le niébé dans le système de cultures, la Figure 22 ne présente pas de différence significative par rapport à la quantité de N₂ fixée. Seule la quantité de N qui provient du sol du niébé en association présente une différence significative par rapport à celui de la monoculture du niébé indiquant une économie de l'azote du sol en faveur de la céréale en association.

Andersen *et al.*, (2004) ont rapporté que la compétition interspécifique avait un effet favorisant le pourcentage d'azote dérivé de la fixation de N₂ du pois et surtout, quand la fertilisation en N est faible. Les derniers auteurs indiquent également que le type de céréale influence la fixation biologique de l'azote. Par ailleurs, il a été observé que le potentiel de la pratique intercalaire, comme moyen d'augmenter la contribution du N de la fixation atmosphérique, se perd au fur et à mesure que le niveau de fertilisation azotée augmente (Andersen *et al.*, 2004).

5.5. Conclusion Partielle

La germination difficile et la faible fertilité du sol ont beaucoup entravé le développement du niébé, ce qui s'est traduit par de faibles rendements et donc par de petites quantités d'azote fixé. Cependant, il en est ressorti le rôle important que joue le phosphore dans la production du niébé et sur la fixation biologique de l'azote. Les différentes sources de phosphore ont amélioré les rendements du niébé. L'influence du PNT s'est beaucoup manifestée à travers le phospho-compost, mettant ainsi en évidence la possibilité de sa valorisation à travers le compostage de résidus culturaux. Cet impact positif sur les rendements du niébé, prouve que le phospho-compost est une technologie prometteuse.

Chapitre VI. Discussion générale

L'objectif global de nos travaux était d'étudier des modes de gestion intégrée de la fertilité du sol dans les systèmes de cultures à base de niébé, permettant d'améliorer la fertilité du sol et les rendements des cultures en vue de contribuer à la sécurité alimentaire. Notre approche a été bâtie autour de l'hypothèse centrale selon laquelle, une gestion intégrée des fumures minérales et organiques, associée au potentiel de fixation de l'azote atmosphérique par le niébé, permet d'améliorer la fertilité du sol, la nutrition azotée et les rendements de la céréale et de la légumineuse.

6.1. Quelle est la contribution du niébé et des fumures sur la nutrition azotée et les rendements du mil ?

Nos résultats ont montré que l'application des différentes technologies de gestion de la fertilité de sol a eu un effet positif sur l'accroissement des rendements du mil, mettant ainsi en évidence la faible fertilité des sols (Bationo et Buerkert, 2001 ; Bationo *et al.*, 2003 ; Fening *et al.*, 2011 ; Winterbottom et al 2013). Dans les sols sableux des zones sahéliennes, l'application des résidus de cultures ou du fumier permet d'améliorer la production agricole (Bationo et Buerkert, 2001 ; Bationo *et al.*, 2012). Dans les zones du Sahel l'application de résidus de culture permet d'accroître significativement les rendements de la céréale, mais ne présente pas d'effet significatif sur les rendements dans les zones soudaniennes (Bationo et Buerkert, 2001). Selon les doses apportées, les amendements organiques sont aussi d'importantes sources de nutriments et peuvent accroître les rendements des cultures (Buerkert *et al.*, 2000 ; Ding *et al.*, 2010 ; Bationo *et al.*, 2012 ; Kiba, 2012 ; Gomgnimbou *et al.*, 2014 :). Cependant, appliqués seuls, les amendements organiques de même que les engrais minéraux, ne permettent pas d'induire des résultats escomptés (Vanlauwe et Giller, 2006 ; Fening *et al.*, 2011 ; Miao *et al.*, 2011 ; Matlas *et al.*, 2012). Leur combinaison (fertilisation organo-minérale) s'avère indispensable pour valoriser leur synergie en vue d'obtenir des rendements optimums (Bado, 2002 ; Bationo *et al.*, 2004 ; Achieng *et al.*, 2010 ; Vanlauwe *et al.*, 2010; Fening *et al.*, 2011 ; Bationo *et al.*, 2012 ; Matlas *et al.*, 2012 ; Ouédraogo *et al.*, 2014). Par ailleurs, les technologies dites moyennes car utilisant de faibles quantités d'engrais et valorisant les sources naturelles d'éléments nutritifs, avec une densité

de semis relativement élevée, se sont montrées toutes plus productives que la pratique traditionnelle. Ainsi, l'utilisation de la micro-dose de NPK au poquet a conduit à des rendements de mil élevés, résultant de la croissance rapide des plantes. En effet, le NPK, appliqué au semis permet un développement rapide des racines et une utilisation efficace de l'eau et des éléments nutritifs, mettant ainsi la plante à l'abri des stress hydriques de début et de fin de saison (Tabo *et al.*, 2011). Cette stratégie d'application de l'engrais au poquet est une opportunité pour les paysans aux ressources limitées. Le coût de l'investissement en fertilisant minéral est en effet plus faible, et elle permet une augmentation sensible des rendements des cultures.

Nos résultats ont montré l'effet positif de l'inclusion du niébé dans les systèmes de cultures. Le précédent niébé a permis d'améliorer les rendements du mil par rapport à la culture continue du mil au niveau de toutes nos technologies. L'utilisation de la méthode isotopique (^{15}N) a permis de mettre en évidence le rôle important que joue la rotation avec les légumineuses dans les systèmes de cultures céréale-légumineuse (Bationo *et al.*, 2002 ; Bado, 2002 ; Bado *et al.*, 2006 ; Bado *et al.*, 2012). La rotation avec le niébé a influencé de manière significative l'utilisation de l'azote par le mil. Le mil en rotation a conduit à une meilleure absorption de l'azote provenant de l'engrais minéral, et à un meilleur prélèvement de l'azote du sol que la culture continue du mil. Le précédent niébé a significativement amélioré le taux d'absorption et de prélèvement de l'azote du sol par le mil et ce, quel que soit le traitement. L'effet azote des légumineuses explique en partie ces résultats. Par le processus de la fixation symbiotique, les légumineuses mobilisent l'azote de l'atmosphère, et une quantité importante des résidus des légumineuses est annuellement recyclée dans le sol, constituant une source d'azote organique pour la culture suivante. Les résidus des légumineuses sont particulièrement riches en azote et constituent une source d'azote organique pouvant augmenter la disponibilité de l'azote dans le système. Des facteurs autres que l'effet de la fixation biologique de l'azote ont été évoqués. Ce sont : l'amélioration des propriétés biologiques et physiques du sol, la conservation et la restauration de la matière organique et le contrôle des maladies (Bationo *et al.*, 2002 ; Carsky *et al.*, 2002). De ce fait, la combinaison des fumures organiques et minérales associée à la rotation du mil avec les légumineuses, induit de plus une meilleure mobilisation de l'azote du sol et une utilisation efficace de l'engrais azoté et des autres éléments nutritifs. Bado *et al.* (2008) ont rapporté que des

stratégies de gestion intégrée utilisant judicieusement de faibles doses d'engrais, les amendements organiques et minéraux en association ou en rotation avec les légumineuses peuvent permettre d'améliorer la productivité des systèmes traditionnels. Il en résulte alors une amélioration considérable des rendements de la céréale. Le niébé serait capable de fixer 240 kg N ha^{-1} et pourrait contribuer à améliorer la fertilité du sol à hauteur de $60\text{-}70 \text{ kg N ha}^{-1}$, disponible pour la céréale subséquente (Singh *et al.*, 2011). Dans ces conditions, le niébé est véritablement une culture d'avenir pour les pays en développement. Giller (2001) disait : « *en tant que témoin de la productivité phénoménale des légumineuses, totalement dépendantes de la fixation biologique de l'azote dans les sols appauvris des tropiques, je reste confiant que la fixation biologique de l'azote à un rôle majeur à jouer dans le développement futur de l'agriculture* ».

Bossuet et Vadez (2013) ont rapporté que, outre leur potentiel pour augmenter la fertilité des sols, les légumineuses apportent d'autres bénéfices importants aux producteurs dans différents systèmes agraires. Selon Odendo *et al.* (2011), les légumineuses contribuent de façon significative à la sécurité alimentaire, à la génération de revenu et à la maintenance de l'environnement dans la plupart des systèmes de production des agriculteurs en Afrique subsaharienne. Elles constituent des cultures de rentes pouvant rapporter des revenus financiers aux producteurs (Bado *et al.*, 2008), elles sont riches en protéines et en énergie pour l'alimentation humaine et fournissent un fourrage de qualité au bétail (Odendo *et al.*, 2011). Les fanes des légumineuses serviront à l'alimentation des animaux, produisant un fumier riche en éléments nutritifs. Un tel système permettra un recyclage des éléments nutritifs assurant une gestion durable de la fertilité des sols. Elles jouent un rôle très important dans les systèmes de cultures tropicaux des zones semi-arides (Bationo *et al.*, 2011 ; Nandwa *et al.*, 2011). Judicieusement exploitées, les légumineuses aideraient les producteurs à gérer durablement la fertilité des sols et la productivité de leurs systèmes (Bado *et al.*, 2008). Pour une agriculture plus productive, il s'avère alors nécessaire d'optimiser l'action fertilisante des légumineuses. La sélection des génotypes à haut pouvoir fixateur d'azote et à haut rendement, est un des moyens utilisés pour améliorer la fertilité du sol dans les systèmes traditionnels de cultures africains, eu égard au coût élevé des engrais conventionnels qui sont inaccessibles aux petits cultivateurs (Belane *et al.*, 2011). Par ailleurs, les techniques d'inoculation des plantes avec des microorganismes symbiotiques constituent également un moyen d'amélioration de la production des légumineuses (Haro *et al.*, 2012 ; Mmbaga *et al.*, 2014).

Cependant, selon Bossuet et Vadez (2013), la sélection de variétés de légumineuses performantes dans la fixation azotée serait donc plus bénéfique que l'investissement dans la recherche sur les inoculums de rhizobiums. Cela est particulièrement vrai dans les systèmes de cultures des pays en développement en milieu aride et semi-aride, où les contraintes abiotiques extrêmes comme le stress hydrique et les déficiences en nutriments du sol, affectent de manière plus prononcée la plante entière d'une légumineuse à graine, en comparaison avec le microsymbionte dans le nodule ou dans le sol. En outre, Woomer *et al.* (2014) ont rapporté qu'en Afrique de l'Ouest, le niébé est facilement colonisé par des rhizobiums naturels et l'inoculation n'est pas nécessaire. Les exigences contrastées des légumineuses à graines pour l'inoculation avec des rhizobiums peuvent être mieux examinées en comparant les exemples du soja, qui nécessite souvent l'inoculation et le niébé, qui répond rarement à l'inoculation (Giller, 2001).

6.2. Quel est le rôle du phosphore sur les rendements du niébé ?

Les phosphates naturels (PN) sont disponibles dans la plupart des pays en développement. Des technologies permettant de les valoriser seraient un grand avantage pour la gestion du phosphore, élément très important dans le cycle végétatif de la plante et dont la faible teneur des sols est le facteur le plus limitant de la production végétale. Nos résultats ont montré que l'application de PNT au poquet après le sarclage, est une technologie prometteuse pour son utilisation, car elle permet de réduire la contrainte liée à son aspect pulvérulent. En outre, l'efficacité agronomique des phosphates naturels peut être améliorée lorsqu'ils sont incorporés dans le système de compostage de résidus de culture. Le compostage de résidus organiques avec du PN est un moyen biologique pour augmenter son efficacité agronomique. Cette technologie permet également de réduire la contrainte liée à leur aspect pulvérulent. Le phospho-compost (PC) est en effet une technique prometteuse pour augmenter la solubilité des PN et la disponibilité du phosphore P pour les plantes. L'effet positif du phospho-compost sur la production agricole a été démontré par de nombreuses études (Akande *et al.*, 2005 ; Makinde, 2013 ; Sharif *et al.*, 2013 ; Ali *et al.*, 2014). L'augmentation de la libération de phosphore par les phosphates naturels serait due à l'acidification du PN par les acides organiques, et surtout de leur capacité de chélation sur le calcium (Ca), le fer (Fe) et l'aluminium (Al) (Zapata et Roy, 2004). Le PC a donné le meilleur résultat sur la production du niébé par rapport aux autres traitements. Les racines des légumineuses valorisent mieux

l'utilisation du phosphore (Bationo *et al.*, 2002, Dakora et Phillips, 2002 ; Saidou *et al.*, 2007 Mahamane, 2008). Les plantes légumineuses sont généralement moins exigeantes en engrais et valorisent mieux le phosphore peu soluble des phosphates naturels par exemple (Saidou *et al.*, 2007 ; Bado *et al.*, 2008). Elles sont capables de sécréter des substances acides qui favorisent la dissolution du phosphate naturel (Zapata et Roy, 2004). L'action des substances acides sur le phosphate naturel du phospho-compost, résulte également de la stimulation de l'activité microbienne favorable à la décomposition de la matière organique.

Malgré l'intérêt manifeste en faveur de l'association céréale-légumineuse, celle-ci conduit le plus souvent à de faibles rendements du niébé. La culture du niébé est sensible, entre autres, à la déficience en phosphore, aux maladies et aux insectes. Elle ne supporte pas non plus l'excès d'humidité, en particulier au stade de germination. Au cours de notre expérimentation, cette dernière contrainte a négativement influencé les rendements, ainsi que la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, aussi bien en association qu'en monoculture. Les rendements du niébé et les quantités d'azote fixées ont été faibles. Comparativement au témoin, les options de fertilisation ayant apporté des sources de phosphore ont donné les meilleurs rendements, mettant ainsi en évidence le rôle que joue le phosphore dans la production du niébé (Bationo *et al.*, 2002 ; Jemo *et al.*, 2006 ; Bado *et al.*, 2008 ; Magani et Kuchinda, 2009 ; Saidou *et al.*, 2011 ; Singh *et al.*, 2011 ; Mmbaga, 2014).

6.3. Quelles sont les stratégies de gestion de la fertilité des sols qui permettront d'améliorer les rendements des cultures ?

Le Land Equivalent Ratio (LER) permet de rendre compte de l'efficacité de l'utilisation de la terre. Un LER supérieur à 1 indique que l'association des cultures est plus efficace que la monoculture (Dariush *et al.*, 2006 ; Mohammed, 2012 ; Amanullah *et al.*, 2016). Nos résultats ont conduit à un LER moyen de 1,46, donnant ainsi un avantage de 46 % par rapport aux cultures purs. L'association des cultures présente une stabilité de la production en année pluvieuse ou non (Bationo *et al.*, 2003). L'utilisation efficace des facteurs de production environnementaux, la minimisation des risques d'échec de production, l'amélioration de la fertilité du sol et sa protection, constituent les principales raisons pour lesquelles l'association des cultures est pratiquée (Dariush *et al.*, 2006 ; Rusinamhodzi *et al.*,

2012 ; Amanullah *et al.*, 2016). Le traitement avec le Super Phosphate Simple pour lequel la densité de semis est la plus forte (1 m x 0,5 m), a présenté le LER le plus élevé (1,52), confirmant le fait que l'efficacité de l'association céréale-légumineuse augmente avec la densité de semis (Olufajo et Singh, 2002).

Les technologies moyennes utilisant de faibles quantités d'engrais et valorisant les sources naturelles d'éléments nutritifs telles que la micro-dose de NPK aux poquets, les phosphates naturels aux poquets, et le phospho-compost, sont des technologies qui améliorent significativement les rendements des cultures. Elles se sont montrées toutes plus productives que la pratique traditionnelle. Nos résultats ont ainsi montré que la combinaison de la matière organique et des engrais minéraux associée au potentiel de la fixation biologique à travers la rotation avec les légumineuses, valorise la synergie des éléments nutritifs pour optimiser les rendements de la céréale subséquente. La présence de la légumineuse améliore le taux de prélèvement de l'azote, la mobilisation de l'azote du sol, et l'efficacité de l'utilisation des engrais minéraux azotés par la céréale qui succède à la légumineuse (Bado, 2002 ; Bationo *et al.*, 2002 ; Bado *et al.*, 2006 ; Bado *et al.*, 2008 ; Bado *et al.*, 2012 ; Omae *et al.*, 2014).

Nos résultats ont montré que toutes ces technologies appliquées aux systèmes de cultures mil-niébé, présentent un LER supérieur à 1, montrant clairement que ces technologies permettent une utilisation rationnelle de la terre par rapport à la monoculture du mil.

Conclusion générale, recommandations et perspectives

En Afrique subsaharienne, la sécurité alimentaire repose essentiellement sur l'accroissement de la production agricole. La gestion intégrée de la fertilité du sol (GIFS) représente un facteur clé d'amélioration de la faible productivité des sols et des cultures en Afrique. Une gestion intégrée et durable de la fertilité des sols constitue une condition préalable à l'amélioration de la productivité agricole. Au Niger, l'agriculture étant une agriculture de subsistance, une gestion intégrée et durable de la fertilité des sols nécessite la combinaison de faibles quantités disponibles d'engrais minéraux et de fumures organiques dans les systèmes de cultures à base de légumineuses. Les résultats agronomiques des différentes stratégies de gestion de la fertilité des sols testées, montrent qu'elles présentent un potentiel pour accroître les rendements du mil.

L'objectif de notre étude était d'évaluer différents modes de gestion intégrée de la fertilité du sol, et de proposer des alternatives permettant d'améliorer la fertilité du sol et les rendements des cultures, en vue de contribuer à la sécurité alimentaire. Différentes stratégies à faibles intrants, valorisant les sources naturelles d'éléments nutritifs et combinant des doses d'engrais organiques et minéraux, ont été ainsi utilisées dans les systèmes de cultures mil-niébé. Les principaux paramètres mesurés étaient les rendements, la nutrition azotée du mil subséquent, le Land Equivalent Ratio (LER) et la fixation biologique de l'azote.

Au Sahel où l'accès à la fumure organique et minérale est limité, les technologies moyennes utilisant de faible quantité d'engrais et valorisant les sources naturelles d'éléments nutritifs telles que la micro-dose de NPK aux poquets, les phosphates naturels aux poquets, et le phospho-compost, sont des technologies qui améliorent significativement les rendements des cultures. Elles ont toutes conduit à des meilleurs rendements comparativement à la pratique traditionnelle.

L'inclusion du niébé dans les systèmes de cultures est une opportunité qui permet d'accroître la productivité agricole des systèmes traditionnels. Le précédent niébé permet d'améliorer les rendements du mil par rapport à sa monoculture, quelle que soit la technologie

appliquée. Il améliore significativement le taux d'absorption et de prélèvement de l'azote du sol par le mil subséquent.

En dépit du fait que la rotation légumineuses-céréales présente beaucoup d'avantages, les producteurs nigériens pratiquent plus couramment l'association des cultures à base de niébé. Cette pratique (l'association culturale) n'a qu'un seul avantage majeur : son efficacité à l'utilisation optimale des facteurs de production environnementaux.

Nos résultats ont ainsi montré que la combinaison de la matière organique et des engrais minéraux associé au potentiel de la fixation biologique à travers la rotation avec les légumineuses, valorise la synergie des éléments nutritifs pour optimiser les rendements de la céréale subséquente. La présence de la légumineuse améliore le taux de prélèvement de l'azote, la mobilisation de l'azote du sol et l'efficacité de l'utilisation des engrais minéraux azotés par la céréale qui succède à la légumineuse.

Nos résultats ont également montré que toutes ces technologies appliquées aux systèmes de cultures mil-niébé, présentent un LER supérieur à 1, montrant clairement que ces technologies permettent une utilisation rationnelle de la terre par rapport à la monoculture du mil.

Il ressort des résultats que nous avons obtenus, que notre hypothèse centrale stipulant qu'une gestion intégrée des fumures minérales et organiques, associée au potentiel de fixation de l'azote atmosphérique par le niébé, permet d'améliorer la nutrition azotée et les rendements de la céréale et la fertilité du sol, a été vérifiée. Sur cette base, des recommandations peuvent être formulées.

Recommandations

A l'endroit des producteurs

Le précédent niébé améliore significativement le taux d'absorption et de prélèvement de l'azote du sol par le mil subséquent, et par conséquent accroît son rendement. Cette pratique peut donc être recommandée à l'endroit des producteurs ainsi que :

- l'application des technologies moyennes testées, utilisant de faible quantité d'engrais et valorisant les sources naturelles d'éléments nutritifs telles que la micro-dose de NPK aux poquets ;
- l'usage de phospho-compost et de phosphates naturels aux poquets, technologies qui améliorent significativement les rendements des cultures et qui se sont montrées toutes plus productives que la pratique traditionnelle ;
- la combinaison de la matière organique et des engrais minéraux associée au potentiel de la fixation biologique, à travers la rotation avec les légumineuses. Cette approche valorise la synergie des éléments nutritifs pour optimiser les rendements de la céréale subséquente.

A l'endroit des services de vulgarisation, projets de développement et les ONG du domaine agricole

Le phosphate naturel de Tahoua appliqué directement ou sous forme de phospho-compost, a un potentiel d'amélioration des rendements des cultures, mais peu de producteurs l'utilisent. De plus, nos résultats ont montré qu'il est plus avantageux de pratiquer la rotation au lieu de la traditionnelle association céréale-légumineuse qui demeure la pratique prédominante au Niger. Les services de vulgarisation de l'Etat, les projets de développement et les ONG œuvrant dans le domaine agricole, doivent donc sensibiliser les producteurs à travers les champs écoles, les tests de démonstrations et les radios communautaires:

- pour une large utilisation des phosphates naturels de Tahoua, appliqués directement ou sous forme de phospho-compost ;
- pour la pratique de la rotation avec le niébé.

A l'endroit des structures de recherche

Malgré les nombreux avantages offerts par le niébé, sa production est faible à cause de multiples contraintes dont la déficience en phosphore du sol. L'existence de gisements de phosphate naturel au Niger est une opportunité que la recherche doit saisir en vue de valoriser leur utilisation et accroître la production du niébé.

Les engrais conventionnels étant chers et inaccessibles aux petits exploitants agricoles, la sélection des génotypes de niébé à fort potentiel de fixation de l'azote et à haut rendement est une alternative d'amélioration durable de la fertilité du sol dans les systèmes de cultures traditionnels. Les chercheurs doivent intensifier les travaux dans ce domaine.

A l'endroit de l'Etat

L'Etat du Niger doit prendre des mesures nécessaires pour l'exploitation du gisement des phosphates naturels de Tahoua, et l'amélioration de son accessibilité aux producteurs.

Perspectives

Nos travaux ont apporté des réponses à nos interrogations de départ, mais ont suscité d'autres questions.

Il nous semble que, pour favoriser la pratique de la rotation qui s'est avérée utile pour l'amélioration de la nutrition azotée et des rendements du mil, il faille entreprendre la conduite des tests de démonstration en milieu réel.

De même, des recherches méritent d'être poursuivies sur la culture en bandes mil-niébé, en vue de son introduction dans les systèmes de cultures traditionnels, car elle permet d'accroître les rendements du mil et du niébé.

Le phospho-compost est un moyen d'améliorer l'efficacité agronomique des phosphates naturels et de lever la contrainte liée à leur aspect pulvérulent. C'est une technologie très prometteuse. Cependant, leur solubilisation par compostage dépend de la qualité et de la quantité de la matière organique. La recherche doit s'investir pour déterminer les matériaux

de qualité, leur quantité et celle des phosphates naturels pour la production de phospho-compost de qualité.

L'utilisation de la méthode isotopique de (^{32}P) pourrait être envisagée pour aider à comprendre le devenir de P du phospho-compost, son absorption par la plante et son impact sur les rendements des cultures.

La technologie de micro-dose de NPK améliore significativement les rendements des cultures. Elle est en train d'être vulgarisée, mais son impact à long terme sur le rendement et les propriétés chimiques du sol n'est pas encore connu. La recherche se doit d'entreprendre cette évaluation et les isotopes notamment le ^{15}N et le ^{32}P pourraient être utilisés à cette fin.

Les légumineuses à graines, notamment le niébé, présentent de multiples avantages sur lesquels on peut s'appuyer pour développer une agriculture plus productive et de qualité nutritionnelle élevée dans les tropiques semi-arides. La sélection variétale assistée par mutagenèse permet de développer des caractéristiques chez la plante. Il est alors nécessaire d'établir une meilleure collaboration entre les équipes de recherche en sciences du sol et en amélioration variétale afin d'entreprendre la sélection des géotypes de niébé à fort potentiel de fixation de l'azote et à haut rendement pour une amélioration sensible des rendements du niébé et du mil au Niger.

Références bibliographiques

- Abaidoo R.C., Kessel C.V., 1989. ^{15}N -uptake, N_2 -Fixation and rhizobial, interstrain competition in soybean and bean, intercropped with maize. *Soil Biology and Biochemistry*, 21:155-159.
- Achieng J.O., Ouma G., Odhiambo G., Muyekho F., 2010. Effect of farmyard manure and inorganic fertilizers on maize production on Alfisols and Ultisols in Kakamega, western Kenya. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(4): 430-439.
- AFNOR, 1981., Détermination du pH. Association Française de Normalisation NF ISO 103 90. *In: AFNOR Qualité des sols*, Paris, France. pp 339-348.
- Agbenin J.O., Goladi J.T., 1998. Long- term soil fertility trend in the savanna as influenced by farmyard manure and inorganic fertilizer. *In: G.Renard A. neef , K Becker and M Von Oppen (eds). Soil Fertility Management in West African land use systems Proceedings of the Regional Workshop, University of Hohenheim, ICRISAT Sahelien Centre and INRAN, 4-8 March 1997, Niamey, Niger.* pp 21-29.
- AIEA., 2001. Use of Isotope and Radiation Methods in Soil and Water Management and Crop Nutrition. IAEA Training Course Series 14. Vienna. pp 21-103.
- AIEA., 2002. Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production. IAEA-TECDOC-1272. 2002, 473 p.
- Ajeigbe H.A., Singh B.B., Musa A., Adeosun J.O., Adamu R.S. Chikoye D., 2010. Improved cowpea–cereal cropping systems: cereal–double cowpea system for the northern Guinea savanna zone. IITA, Ibadan, Nigeria. 17 p.

- Akandé M.O., Adediran J.A., Oluwatoyinbo F.I., 2005. Effects of rock phosphate amended with poultry manure on soil available phosphorus and yield of maize and cowpea. *African Journal of Biotechnology* 4 (5): 444-448.
- Akandé M.O., Makinde E.A., Oluwatoyinbo F. I., Adetunji M. T., 2010. Effects of phosphate rock application on dry matter yield and phosphorus recovery of maize and cowpea grown in sequence. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4 (5): 293-303.
- Ali A., Sharif M., Wahid F., Zhang Z., Shah S.N.M., Rafiullah., Zaheer S., Khan F., Rehman F., 2014. Effect of Composted Rock Phosphate with Organic Materials on Yield and Phosphorus Uptake of Berseem and Maize. *American Journal of Plant Sciences*, 5:975-984.
<http://www.scirp.org/journal/ajps> <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.57110>
- Amanullah., Khan F., Muhammad H., Jan AU., Ali G., 2016. Land Equivalent Ratio, Growth, Yield and Yield Components Response of Mono-cropped vs. Inter-cropped Common Bean and Maize With and Without Compost Application. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 7(2):40-49.
- Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E. S., 2004. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant and Soil*, 266: 273-287.
- Autfray P., Sissoko F., Falconnier G., Ba A., Dugué P., 2012. Usages des résidus de récolte et gestion intégrée de la fertilité des sols dans les systèmes de polyculture élevage : étude de cas au Mali-Sud. *Cahiers Agricultures*, 21: 225-34.
- Axmann H., Zapata F., 1990. Stable and radioactive isotopes. *In: Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships*. Training course N°2. Hardarson G., (eds).pp 9-34.

- Bado B.V., 2002. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de PhD, Université de Laval Québec, Canada. 184 p .
- Bado B.V., Bationo A., Cescas M.P., 2006. Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa). *Biology and Fertility of Soils*. 43(2):171-176.
- Bado B.V., Bationo A., Lompo F., Sedogo M. P., Cescas M. P., Sawadog A., Thio B., 2008. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols et la productivité des systèmes de cultures. *In: Bationo, A., Tabo, R., Waswa, B., Okeyo, J., Kihara, J., Fosu, M., Kabore, S. (eds.) 2008. Synthesis of soil, water and nutrient management research in the Volta Basin. pp 125-139.*
- Bado B.V., Lompo F., Bationo A., Segda Z., Sedogo M.P., Cescas M.P., Mel V.C., 2012. Nitrogen Recovery and Yields Improvement in Cowpea Sorghum and Fallow sorghum Rotation in West Africa Savannah. *Journal of Agricultural Science and Technology*, (2):758-767.
- Bagayoko M., Mason S.C., Traoré S., 1998. The role of cowpea on pearl millet yield, N uptake, and soil nutrient status in millet- cowpea rotation in Mali. *In: G. Renard A. neef , K Becker and M Von Oppen (eds). Soil Fertility Management in West African land use systems. Proceedings of the Regional Workshop, University of Hohenheim, ICRISAT Sahelien Centre and INRAN, 4-8 March 1997, Niamey, Niger. pp 109-114.*
- Bankoula A., Toukoua D., Oumarou M., Soumana I., Casas J., 1998. Le système national de la recherche agronomique du Niger : situation actuelle et stratégie pour le long terme. 150 p. MA/E - MH/E- FAO.
- Banque Mondiale , 2013. Evaluation des risques du secteur agricole au Niger: De la réaction aux crises à la gestion des risques à long terme. Rapport numéro: 74322-NE. Banque internationale pour la reconstruction et le développement / Banque mondiale. 96 p.

- Bationo A., Mokwunye U., Christianson C.B., 1990. Gestion de la fertilité des sols sableux au Niger. Un aperçu de quelques résultats de recherche de l'IFDC/ ICRISAT. *In* : Berrada A., Mahaman I., Gandah M., Actes du séminaire national sur l'aménagement des sols, la conservation de l'eau et la fertilisation, du 20 au 24 février 1989 à Tahoua, République du Niger. pp177-194.
- Bationo A., Koala S., Ayuk É., 1998. Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. *Cahiers Agricultures*, 7(5): 365-371.
- Bationo A., Ntare B.R., 2000. Rotation and nitrogen fertilizer effects on pearl millet, cowpea and groundnut yield and soil chemical properties in a sandy soil in the semi-arid tropics, West Africa. *Journal of Agricultural Science Cambridge*, 134:277-284.
- Bationo A., Buerkert A., 2001. Soil Organic matter management for sustainable land use in the West African Sudano- Sahlien Zone. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 61:131-142.
- Bationo A., Ntare BR., Tarawali S., Tabo R., 2002. Soil Fertility management and cowpea production in the semiarid and tropics. *In*: Fatokum C.A., Tarawali S.A., Sing B.B., Kormewa A.M., Tanio M., (eds), Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production. *Proceeding of World Cowpea Conference III IITA Ibadan Nigeria 4-8 sept 2000*. pp 301-318
- Bationo A., Mokwunye U., Vlek P.L.G., Koala S. Shapiro, 2003. Soil Fertility management for Sustainable Land Use in the West African Sudano-Sahelian Zone., *In*: M.P. Gichuru M.P., Bationo A., Bekunda M.A. Goma C.H., Mafongaonya P.L., Mugendi D.N., Murwira H.M., Nandwa S.M., Nyathi., Swift M.J.,(eds.), *Soil Fertility Management in Africa: A Regional Perspective*. Academy Science Publishers (ASP) TSBF-CIA. pp 253-292.
- Bationo A., Nandwa S.M., Kimetu J.M., Kinyangi J.M., Bado B.V., Lompo F., Kimani S., Kihanda F., Koala S., 2004. Sustainable intensification of crop–livestock systems

- through manure management in eastern and western Africa: Lessons learned and emerging research opportunities. *In: Sustainable crop-livestock production for improved livelihoods and natural resource management in West Africa. Proceedings of an international conference.* Williams T.O., Tarawali S., Hiernaux P., Fernandez-Rivera S., (eds.). pp173-198.
- Bationo A., Kimetu J., Valanauwe B., Bagayoko M., Koala S., Mkwunye A.U., 2011. Comparative Analysis of Current and Potential Role of Legumes in Integrated Soil Fertility Management in West and Central Africa. *In: Bationo A., Waswa B., Okeyo J M., Maina F., Kihara J., Mkwunye U.,(eds.), Fighting Poverty in Sub-Saharan Africa: The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Soil Management.* Springer, New York London. pp 117-150.
- Bationo A., Waswa B.S., 2011. New Challenges and Opportunities for Integrated Soil Fertility Management ISFM in Africa. *In: Bationo A., Waswa B., Okeyo J.M., Maina F., Kihara J., (eds), Innovations as key to the Green Revolution in Africa – Vol .1* Springer, New York London. pp 3-17.
- Bationo A., Waswa B., Abdou A., Bado B.V., Bonzi M., Iwuafor E., Kibunja C., Kihara J., Mucheru M., Mugendi D., Mugwe J., Mwale C., Okeyo J., Olle A., Roing K., Sedogo M., 2012. Overview of long term experiments in Africa. *In: Lessons learned from long-term soil fertility management experiments in Africa.* Springer Science + Business Media Dordrecht. pp 1- 26.
- Belane A.K., Asiwe J., Dakora F.D., 2011. Assessment of N₂ fixation in 32 cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes grown in the field at Taung in South Africa, using ¹⁵N natural abundance. *African Journal of Biotechnology*, 10 (55) : 11450-11458.
- Bielders C L., 1998. Amélioration de la productivité d'une culture associée mil-niébé par apport direct des intrants au niébé et rotation entre les rangs. *In: Renard G., Neef A., Becker K., von Oppen M., (eds). Soil Fertility Management in West African land use systems. Proceedings of the Regional Workshop, University of Hohenheim, ICRISAT Sahelien Centre and INRAN, 4-8 March 1997, Niamey, Niger.* pp 101-107.

- Bonzi M., 2002. Evaluation du déterminisme du bilan de l'azote en sols cultivés du centre Burkina Faso : Etude par traçage isotopique ^{15}N au cours d'essais en station et en milieu paysan. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy France. 177 p.
- Bonzi M., Lompo F., Sédogo P.M., 2004. Effet de la fertilisation minérale et organo minérale du maïs et du sorgho en sol ferrugineux tropical lessivé sur la pollution en nitrates des eaux. In : Actes du forum National sur la recherche scientifique et les innovations technologiques (FRSIT) 6^{ème} édition. 18 pp.
- Bonzi M., Lompo F., Ouandaogo N., Sédogo P.M., 2011. Promoting Uses of Indegenous Phosphate Rock for Soil Fertility Recapitalisation in the Sahel: State of the Knowledge on the Review of Rock Phosphate of Burkina Faso. *In*: Bationo A., Waswa B., Okeyo J.M., Maina F., Kihara J., (eds), Innovations as key to the Green Revolution in Africa – Vol . 1 Springer, New York London, pp 381-390.
- Bossuet J., Vadez V., 2013. S'appuyer sur les multiples bénéfices des légumineuses à graines pour une agriculture plus productive et nutritive dans les tropiques semi-arides. *Sécheresse*, 24: 314-321.
- Bray R.H., Kurtz L.T., 1945. Determination of total,- organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59: 39-45.
- Buerkert A., Hiernaux P., 1998. Nutrients in the West African Sudano-Sahelian Zone: losses, transfers and role of external inputs. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences*, 161:365-383.
- Buerkert A., Bationo A., Dossa K., 2000. Mechanisms of residue Mulch-Indued Cereal Growth Increases in West Africa. *Soil Science Society of America Journal*, 64:346-358.

- Carsky R.J., Vanlauwe B., Lyasse O., 2002. Cowpea rotation as a resource management technology for cereal-based systems in the savannas of West Africa. *In: Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production*; Fatokun C.A., Tarawali S.A., Sing B.B., Kormewa A.M Tanio M., (eds) Proceeding of World Cowpea Conference III IITA Ibadan Nigeria 4-8 sept 2000. pp 252-266.
- Chalk P.M., 1996. Nitrogen Transfer from Legumes to cereals in Intercropping. *In: Dynamics of Roots and Nitrogen in Cropping systems of Semi- Arid Tropics*. Ito et al (eds). Japan International Research Center for Agricultural Sciences, pp 351- 374.
- Chalk PM., 1998. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotation: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 49: 303- 316.
- Christianson C.B., Bationo A., Henao J., Vlek P.L.G., 1990. Fate and efficiency of N fertilizers applied to pearl millet in Niger. *Plant and Soil*, 125 (2): 221-231.
- CILSS., 2002. Proposition d'Elément d'Appui à la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols dans le Pays Membres du CILSS. Cas du Niger. Rapport Définitif. 50 p.
- Cleemput O.V., Zapata F., Vanlauwe B., 2008. Use of tracer technology in mineral fertilizer N management. Guidelines on nitrogen management in agricultural systems. IAEA, Vienna, IAEA-TCS 29:19-125.
- Coraf Action., 2011. Lettre d'information pour la recherche et le développement agricole en Afrique de l'Ouest et du Centre. Les phosphates, une richesse pour l'agriculture Ouest africaine. Coraf Action N° 59. 16 p.
- Coulibaly O., Lowenberg-DeBoer J., 2002. The economics of cowpea in West Africa. *In: Fatokun, C.A., S.A. Tarawali, B.B. Singh, P.M. Kormawa, and M. Tamò (eds). 2002. Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production. Proceedings of the World Cowpea Conference III held at the International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria, 4–8 September 2000. IITA, Ibadan, Nigeria. pp 351-366.*

- Dakora F. D., Phillips D. A., 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*. 245: 35-47.
- Dariush M., Ahad M., Meysam O., 2006. Assessing the land equivalent ratio (LER) of two corn [*zea mays* L.] varieties intercropping at various nitrogen levels in Karaj, Iran. *Journal of Central European Agriculture*, 7 (2) : 359-364.
- Dan Guimbo I., 2011. Fonction, dynamique et productivité des parcs à *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn. et à *Neocarya macrophylla* (Sabine) Prance dans le sud-ouest du Niger. Thèse de Doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger. 191 p.
- Delaune M., Reiffsteck M., Feller C., 1991. L'analyse granulométrique de sols et sédiments à l'aide du microgranulomètre « Sedigraph 5000 ET » Comparaison avec la méthode « pipette Robinson » *Cahier ORSTOM Série Pédologie XXVI 2* : 183-189.
- Ding W., Yagi K., Cai Z., Han F., 2010. Impact of Long-Term Application of Fertilizers on N₂O and NO Production Potential in an Intensively Cultivated Sandy Loam Soil. *Water Air Soil Pollution*, 212 : 141-153.
- Donald L. A., 1999. Phosphorus for agriculture. Better Crops with plant food. International Plant Nutrition Institute. LXXXIII (83) 1999, No. 1. 40 p.
<https://ipni.net/.../bcrops.../90fc838cc77111c7852568c60010fe90/>.
- Fairhurst, T. (eds) ., 2015. Manuel de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols. Consortium Africain pour la Santé des Sols, Nairobi. 179 p.
- FAO., 2002. Les grands types de sols du Niger. Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des sols. Abomey, Benin, 9-13 October 2002. 17 p.

- Fatondji D., 2002. Organic amendment decomposition, nutrient release and nutrient uptake by millet(*Pennisetum glaucum*(L.)R. Br.) in a traditional land rehabilitation technique (Zai) in the Sahel. These. University of Bonn. Ecology and Development Series. No.1
- Fening J.O., Ewusi-Mensah N., Safo E.Y., 2011. Short-term effects of cattle manure compost and NPK application on maize grain yield and soil chemical and physical properties. *Agricultural Science Research Journal* 1(3): 69- 83.
- FIDA., 2015. Programme de Développement de l'Agriculture Familiale (ProDAF) dans les régions de Maradi, Tahoua et Zinder Rapport de conception finale.408 p.
- Fisher K., Newton E., 2002. Nitrogen fixation- A general overview. Nitrogen fixation at the millennium. G J Leigh (eds) pp1-34
- Franche C., Lindström K., Elnerch C., 2009. Nitrogen-fixing bacteria associated with leguminous and non leguminous plants . *Plant and soil*, 321:35-59
- Garba A.M., 2007. Etude des possibilités d'amélioration des systèmes de production à base de légumineuses alimentaires (niébé-arachide) dans la zone agro-écologique du Fakara, Sud-ouest du Niger. Diplôme d'Etude Spécialisée. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux et Université de Liège. Communauté Française de Belgique. 72 p.
- GenStat Discovery Edition 4, 2007.VSNInternational Ltd., Hemel Hempstead, UK.
- Giller K.E., Ormesher J., Awah F.M., 1991. Nitrogen Transfer from Phaseolus Bean to Intercropped Maize Measured Using ¹⁵N- Enrichment and ¹⁵N-Isotope Dilution Methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 23 (4):339-346.
- GIZ et KfW., 2015. 25 ans de réhabilitation et de conservation des sols au Sahel. Soutien aux efforts des populations rurales du Niger. 40 p.

- Gnankambary Z., Zougmore R., Lompo F., Sédogo P.M., 2009. Fiche technique : Technique de production et d'utilisation du compost. Laboratoire Sol-Eau-Plante INERA/Kamboinsé. Burkina Faso.
- Gomgnimbou A.P.K., Nacro H.B., Sanon A., Sedogo M.P., Martinez J., 2014. Observed effects of the animal manure application practices on the chemical parameters and status of Lixisols in the south soudanian zone (Bobo-Dioulasso, Burkina Faso). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 5 (1): 214-227.
- Guillaume L., Haussmann B.I.G., Per A., Høgh-Jensen H., 2011. Cowpea N rhizodeposition and its below-ground transfer to a co-existing and to a subsequent millet crop on a sandy soil of the Sudano-Sahelian eco-zone. *Plant Soil*, 340:369–382.
- Hamidou Z., 1997. Isothermes d'Adsorption du Phosphore et Facteurs Physico-Chimiques Resposanbles de l'Adsorption du Phosphore de quelques Sites Représentatifs de l'Ouest du Niger. DEA. Faculté des Sciences et Techniques, Université de Ouagadougou, Burkina Faso. 44 p.
- Haro H., Sanon K.B., Diop I., Kane A., Dianda M., Houngnandan P., Neyra M., Traore A., 2012. Réponse à l'inoculation mycorhizienne de quatre variétés de niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] cultivées au Burkina Faso et au Sénégal. *International Jorunal of Biological and Chemical. Sciences*, 6 (5): 2097-2112.
- Henao J., Baanante C., 2006. Soil Nutrient Mining in Africa. IFDC Report Final: Agricultural Production and Soil Nutrient Mining in Africa. IFDC. Alabana, USA. 13 p.
- Hillebrand W.F., Lundell G.E.F., Bright H.A., Hoffman J.I., 1953. Applied inorganic analysis, 2d ed., New York, John Wiley and Sons, Inc. 1034 p
- Houot S., Francou C., Lineres M., Le Villio M., 2002. Gestion de la maturité des composts : conséquence sur leur valeur amendant et la disponibilité de leur azote. 1^{ère} partie. *Echo-MO n° 34*. 3-4.

- Huber G., SChaub C., 2011. La fertilité des sols : L'importance de la matière organique. Guide des Amendements Organiques. Agricultures et Territoires. Chambre d'Agriculture. Bas Rhin. France. 46 p.
- Husnain., Rochayati S., Sutriadi T., Nassir A., Sarwani M., 2014. Improvement of Soil Fertility and Crop Production through Direct Application of Phosphate Rock on Maize in Indonesia. *Procedia Engineering*, 83 :336 – 343.
- INRAN, 1988. Fiche Technique 2.10 : Fabrication du compost aérien. Fiche technique dans Technologies diffusables et transférables aux producteurs. Ly S.A., Bielders C.L., Duivenbooden V.N., Tassiou A., Gouro A.S et Kumar K.A (eds), Institut National de recherche agronomique du Niger et Institut International de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides.
- Inter-réseaux, 2011. Bulletin de synthèse souveraineté alimentaire. N°2. Agro-écologie : ou en est-on ? SOS FAIM. Belgique. 8 p.
- IRD., 2009. Le mil, aliment du futur au Sahel. Actualité Scientifique Fiche N° 325, 2 p.
- Ismaili M., Weaver RW., 1986. competition between Siratro and Kleingrass for ¹⁵N- labeled mineralized nitrogen *In*: Giller KE. 2001. Nitrogen fixation in tropical cropping system. CAB international. Wallingford.UK. 442 p.
- IUSS Working Group WRB., 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 203 p.
- Iyamurenye F., Dick R.P., 1996. Organic Amendments and Phosphorus Sorption by Soils *Advances in Agronomy*, San Diego, California. Academic Press 56:139-185.
- JAICAF., 2009. Les céréales au Niger— Accent sur le mil et le sorgho. 117 p.

- Jemo M, Abaidoo R.C., Nolte C., W.J. Horst., 2006. Genotypic variation for phosphorus uptake dinitrogen fixation in cowpea on low-phosphorus soils of southern Cameroon. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169: (6) 816-825.
- Jensen E.S., 2008. Dynamics of legume nitrogen fixation in intercrops and in crop rotations. *In: Guidelines on nitrogen management in agricultural systems. Training Course Series No. 29. International Atomic Energy Agency, Vienna.* pp123-142.
- Johnson A.K.C., 1995. Inventory and mining of local mineral resources in West Africa. *In: Use of Phosphate Rock for Sustainable Agriculture in West Africa.* Gerner H., Mokwuneye A.U., (eds) International Fertilizer Development Center. pp 21-40.
- 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, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 172 p.
- Kimani S.K., Nandwa S.M., Mugendi D.N., Obanyi S.N., J Ojiem, Murwira H.K., Bationo A., 2003. Principles of Integrated Soil Fertility Management. *In : M.P. Gichuru M.P., Bationo A., Bekunda M.A. Goma C.H., Mafongaonya P.L., Mugendi D.N., Murwira H.M., Nandwa S.M., Nyathi., Swift M.J.,(eds). Soil Fertility Management in Africa: A Regional Perspective* pp 51- 72.
- Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P N., Bondé D., 2010. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicultura*, 28: 184-189.
- Kretschmar R.M., Hafner H., Bationo A., Marschner H., 1991. Long and short- term effects of crop residues on aluminum toxicity, phosphorus availability and growth of pearl millet in an acid sandy soil. *In: Field Crops Research.* Rebařka et al 1994 : Short and long- term effects of crop residues and of phosphorus fertilization on pearl millet on an acid sandy soil in Niger, West Africa. 36:113-124.

- Lambot C., 2002. Industrial potential of cowpea. *In: Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production.* Fatokun, C.A., S.A. Tarawali, B.B. Singh, P.M. Kormawa, and M. Tamo (eds).. Proceedings of the World Cowpea Conference III held at the International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria, 4–8 September 2000. IITA, Ibadan, Nigeria. pp367-423.
- Laouali A. M., 2004. Le niébé (*Vigna unguiculata* L. (Walp)). Impact du Changement Climatique sur les Systèmes de production au Niger (Afrique de l'Ouest). Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées. Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger.
- Lompo F., 1993. Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso : Etudes des effets de l'interaction phosphates naturels-matières organiques. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale de Côte d'Ivoire. Abidjan, Côte d'Ivoire, 263 p.
- Lompo F., Segda Z., Gnankambary Z., Ouandaogo N., 2009. Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs. *Tropicultura*, 27(2): 105-109.
- Mafongoya P.L., Mugendi D.N., Jama B., Waswa B.S., 2003. Maize based cropping systems in the subhumid zone of East and Southern Africa. *In: Soil Fertility Management in Africa: A Regional Perspective.* Gichuru M.P., Bationo A., Bekunda M.A. Goma C.H., Mafongaonya P.L., Mugendi D.N., Murwira H.M., Nandwa S.M., Nyathi., Swift M.J., (eds). pp 73-122.
- Magani I.E., Kuchinda C., 2009. Effect of phosphorus fertilizer on growth, yield and crude protein content of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) in Nigeria. *Journal of Applied Biosciences*, 23: 1387-1393.
- Mahamane S., 2008. Evaluation of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) genotypes for adaptation to low soil phosphorus conditions and to rock phosphate application PhD Dissertation Texas A&M University, USA. 141 p.

- Makinde E.A., 2013. Growth and Yield of Okra with Rock-Phosphate – Amended Organic Fertilizer. *Journal of Agricultural Science*, 5, (10).
- Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Sinaj S., 2012. Effets à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse*, 3 (3): 148–155.
- Mando A., Bonzi M., Wopereis M.C.S., Lompo F., Stroosnijder L., 2005. Long-term effects of mineral and organic fertilization on soil organic matter fractions and sorghum yield under Sudano-Sahelian conditions. *Soil Use and Management*, 21: 396–401.
- Manu A., Salou M., 1988. Méthodes d’analyses physiques et chimiques de sol au laboratoire des sols de l’INRAN. *Projet Assistance au Laboratoire. USAID/INRAN. Niamey, Niger.* 96 p.
- MDA ., 2010. Plan d’actions opérationnel de la filière niébé du Niger. *PRODEX Rapport définitif.* 93 p. Ministère du Développement Agricole.
- MDA/MRA., 2008 : Rapport de synthèse du Recensement Général de l’Agriculture et du Cheptel au Niger 197 p.
- MDA/PI/FAO., 2006. *Stratégie Décentralisée et Partenariale d’Approvisionnement en Intrants pour une Agriculture Durable.* 50 p. Ministère du Développement Agricole.
- MEF/INS., 2010. *Annuaire statistique des cinquante ans d’indépendance au Niger.* Direction de la Statistique/ Ministère du Développement Agricole. 338 p.
- MEF/INS., 2015. *Agriculture et conditions de vie des ménages au Niger.* Direction de la Statistique/ Ministère du Développement Agricole. 74 p.
- MF/INS., 2012. *Annuaire Statistique du Niger 2007-2011.* p181-189. Direction des Statistiques/ Ministère du Développement Agricole.

- Miao Y., Stewart B A., Zhang F., 2011. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31:397–414.
- Mills A.J., Fey M.V., 2003. Declining soil quality in South Africa: effects of land use on soil organic matter and surface crusting. *South African Journal of Science*, 99 : 429-436.
- Mmbaga G. W., Mtei K. M., Ndakidemi P. A., 2014. Extrapolations on the Use of *Rhizobium* Inoculants Supplemented with Phosphorus (P) and Potassium (K) on Growth and Nutrition of Legumes. *Agricultural Sciences*, 5: 1207-1226.
- Mohammed S.A.A., 2012, Assessing the Land Equivalent Ratio (LER) of Two Leguminous Pastures (CLITORIA and SIRATRO) Intercropping at Various Cultural Practices and Fencing at ZALINGEI –Western Darfur State – Sudan. *ARP Journal of Science and Technology*, 2(11): 1074-1080.
- Mokwuneye A.U., Bationo A., 2011. Meeting the Demands for Plant Nutrients for an African Green Revolution: The Role of Indigenous Agromineral. *In* : Bationo A., Waswa B., Okeyo J.M., Maina F., Kihara J., (eds), *Innovations as key to the Green Revolution in Africa – Vol.1*. Springer, New York London. pp 19-29.
- Morou B., 2010. Impacts de l’occupation des sols sur l’habitat de la girafe au Niger et enjeux pour la sauvegarde du dernier troupeau de girafes de l’Afrique de l’Ouest. Thèse de Doctorat, Université Abdou Moumouni. Niamey , Niger. 231 p.
- Mugwira L., Nyamangara J., Hikwa D., 2002. Effect of manure and fertilizer on maize at a research station and in a smallholder (peasant) area of Zimbabwe. *Plant Soil*, 33: 379-402.
- Mulambuila M.N., Kamambo R.M., Jadika C.T., Tshibamba J.M.M., Mukanya M.K.B., 2015. Étude comparative de quelques fertilisants (Bat-guano et DAP) sur le rendement du niébé (*Vigna unguiculata*, L. Walp.) dans la région de Gandajika (RDC). *Journal of Applied Biosciences*, 92:8651-8658.

- Nandwa S.M., 2003. Perspectives on soil fertility in Africa. *In: Soil fertility Management in Africa: A Regional Perspective*. Gichuru M.P., Bationo A., Bekunda M.A. Goma C.H., Mafongaonya P.L., Mugendi D.N., Murwira H.M., Nandwa S.M., Nyathi., Swift M.J.,(eds).pp 2-50.
- Nandwa S.M., Obanyi S.N. & P.L. Mafongoya., 2011, Agro-Ecological Distribution of Legumes in Farming Systems and Identification of Biophysical Niches for legumes Growth. *In: Fighting Poverty in Sub-Saharan Africa: The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Soil Management*. Bationo A., Waswa B.,Okeyo J M., Maina F., Kihara J., MoKwunye U., (eds), Springer, New York London pp 1-26.
- Natatou I., Adamou Z., Ikhiri K., Boos A., Guille J., Rastegar F., Burgard M., 2005. Caractérisation physico-chimique du phosphate naturel de Tahoua (NIGER). *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 30 (1) : 67-76.
- Nyathi P., Kiamani S.K., Jama B., Mapfumo P., Murwira H.k., Okalebo J.R., Bationo A., 2003. Soil Fertility Management in Semi Arid Areas of East and Suthern Africa. . *In: Soil fertility Management in Africa: A Regional Perspective*. Gichuru M.P., Bationo A., Bekunda M.A. Goma C.H., Mafongaonya P.L., Mugendi D.N., Murwira H.M., Nandwa S.M., Nyathi., Swift M.J (eds).pp 220-252
- Nyoki D., Ndakidemi P.A., 2014. Effects of *Bradyrhizobium japonicum* inoculation and supplementation with phosphorus on macronutrients uptake in cowpea (*Vigna unguiculata*(L.) Walp) *American Journal of Plant Sciences*, 5: 442-451.
- Odendo M., Bationo A., Kimani S., 2011. Socio-economic contribution of legumes to livelihoods in Sub-Sahara of Africa. *In: Fighting Poverty in Sub-Saharan Africa: The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Management*. Bationo A., Waswa B.,Okeyo J M., Maina F., Kihara J., MoKwunye U (eds), Springer, New York London pp 27-46.

- O'Hara G.W., Howieson J.G., Graham P.H., 2002. Nitrogen fixation and agriculture practice. In: Nitrogen fixation at the millennium. G J Leigh (eds) pp 391- 420.
- Olufajo O.O., Singh B.B., 2002. Advances in cowpea cropping systems research In: Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production, Fatokum C.A., Tarawali S A., Sing B B., Kormewa A M., Tanio., (eds) Proceeding of World Cowpea Conference III, IITA, Ibadan, Nigeria, 4-8 sept 2000. pp 267-277.
- Omae H., Saidou A K., Tobita S., 2014. Improving Millet-Cowpea Productivity and Soil Fertility with Crop Rotation, Row Arrangementt and Cowpea Density in Sahel, West Africa. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 14 (2): 110-115.
- Ouattara B., 2009. Analyse-diagnostic du statut organique et de l'état structural des sols des agrosystèmes cotonniers de l'Ouest du Burkina Faso (terroir de Bondoukui). Thèse de doctorat d'Etat, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 186 p.
- Ouédraogo E., Mando A., Brussaardc L., 2006. Soil macrofauna affect crop nitrogen and water use efficiencies in semi-arid West Africa. European Journal of Soil Biology, 42: 275–277.
- Ouédraogo J., Ouédraogo E., Nacro H.B., 2014. Effet de l'interaction entre des modes de gestion de fertilité et la macrofaune sur la productivité du niébé et du sorgho en zone nord soudanienne du Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 8(1):104-114.
- Pallo F.J.P., Asimi S., Assa A., Sedogo P.M., Sawadogo N., 2006. Statut de la matière organique des sols de la région sahélienne du Burkina Faso. Etude et Gestion des Sols, 13(4) : 289- 304.
- Pandey R.K., Maranville J.W., Crawford T.W., 2001. Agriculture Intensification and Ecologically Sustainable Land Use Systems in Niger: Transition from Traditional to technologically Sound Practices. Journal of Sustainable Agriculture, 19(2): 6-24.

Payne W.A., 2006. Dryland cropping systems of semiarid West and East Africa *In*: Mahamane S., 2008. Evaluation of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) genotypes for adaptation to low soil phosphorus conditions and to rock phosphate application. PhD Dissertation, Texas A&M University, USA. 141 p.

Pelloux P., Dabin B., F'illmann G., Gomez P., 1971. Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols. Initiations - documentations techniques N°17. ORSTOM. Paris France.121 p.

People M.B., Boddey R.M., Herridge D.F., 2002. Quantification of nitrogen fixation. *In* : Nitrogen fixation at the millennium. G J leigh (eds) pp 357-389.

Powell J.M., Valentine C., 1998. Effects of livestock on soil fertility in West Africa. *In*: Renard G., neef A., Becker K., M von Oppen, (eds). Soil Fertility Management in West African land use systems Proceedings of the Regional Workshop, University of Hohenheim, ICRISAT Sahelien Centre and INRAN, 4-8 March 1997, Niamey, Niger. pp 319-338.

RECA., 2013. Bonnes pratiques de CES/DRS – Conservation des eaux et des sols / Défense et restauration des sols. Contribution à l'adaptation au changement climatique et à la résilience des producteurs - Les expériences de quelques projets au Sahel.

<http://www.reca-niger.org/spip.php?article563>

Reddy, K. C., Gonda J., 1985. Recherche en culture associée au Niger. Liaison-Sahel n° 3 : 109-125.

Rekacewicz P., 2011. Zones biogéographiques. In : Le Monde diplomatique. Au Niger, le cycle des crises alimentaires. Olivier de Sardan J.P.

<http://blog.monediplo.net/2011-01-07-Au-Niger-le-cycle-des-crisis-alimentaires>

Renard C., Boudouresque E., Schmelzer G., Bationo A., 1991. Evolution de la végétation dans une zone protégée du Sahel (Sadoré, Niger). *In*: La jachère en Afrique de l'Ouest,

- Floret C., Serpantié G., (eds), Colloques et Séminaires, ORSTOM, Paris France, pp 297-305.
- Rusinamhodzi L., Corbeels M., Nyamangara J., Giller K. E., 2012. Maize–grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Research*, 136: 12-22.
- Saidou A K., 2005. Variability cowpea within genotype to applied phosphorous and residual effecton sorghum production on P deficient soil of Sudan and Sahel Savanns, Ph.D. thesis, Ahmadu Bello University Zaria, Nigeria
- Saidou A K., Abaidoo R C., Singh B B., Iwuafor E N O., Sanginga N., 2007. Variability of cowpea breeding lines to low phosphorus tolerance and response to external application of phosphorus. *In: Bationo A., Waswa B., Kiharu J., Kimetu J., (eds.), Advances in Integrated Soil Fertility Management in Sub-Sahara Africa: Challenges and Opportunities.* pp 413-421.
- Saidou A.K., Abaidoo R.C., Ewuafor E.N.O., Sanginga N., Singh B.B., 2011. Genotypic variation in cowpea (*Vigna unguiculata*L.) for Rock Phosphate Use in Low Phosphorus Soils of Dry Sudan and Sahel Savanns of Niger and Nigeria, West Africa *American-Euro Asian Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 11(1):62-70.
- Sanginga N., Bergvinson D., 2015. Oléagineux et Niébé. Document de référence : Un plan d'action pour la transformation de l'agriculture africaine, Nourrir l'Afrique 21-23 octobre 2015. Centre International de Conférence Abdou Diouf, Dakar, Sénégal, 30 p.
- SDR., 2006. Plan d'Action. Le secteur rural, principal moteur de la croissance économique. Comite Interministériel de Pilotage de la Stratégie de Développement Rural/ Secrétariat Exécutif.164 p.

- Sharif M., Burni T., Wahid F., Khan F., Khan S., Khan A., Shah A., 2013. Effect of Rock Phosphate Composted with Organic Materials on Yield and Phosphorus Uptake of Wheat and Mung Bean Crops. Pakistan . Journal of . Botany, 45(4): 1349-1356.
- Singh A., Baoule A. L., Ahmed H. G., Dikko A. U., Aliyu U., Sokoto M. B., Alhassan J., Musa M., Haliru B., 2011. Influence of phosphorus on the performance of cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) varieties in the Sudan savanna of Nigeria. Agricultural Sciences, 2 (3): 313-317.
- Subbarao G.V., Renard C., Payne W.A., Bationo A., 2000. Long-term effects of tillage, phosphorus fertilization and crop rotation on pearl millet-cowpea productivity in the west-African Sahel. Experimental. Agriculture, 36 (2): 243-264.
- Tabo R., Bationo A., Bruno G., Ndjeunga J., Marchal D., Amadou B., Annou M .G., Sogodogo D., Sibiry Taonda J.B., Ousmane H., Diallo M.K., Koala S., 2007. Improving cereal productivity and farmers income using a strategic application of fertilizers in West Africa. In: Bationo A., Waswa B., Kiharu J., Kimetu J., (eds.), Advances in integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: Challenges and opportunities, pp 201-208.
- Tabo R., Bationo A., Amadou B., Marchal D., Lompo F., Gandah M., Hassane O., .. Diallo M.K., Ndjeunga J., Fatondji D., Gerard B., Sogodogo D., Taonda J.B.S., Sako K., Boubacar S., Abdou A., Koala S., 2011. Fertilizer Microdosing and Warrantage or Inventory Credit Systems to Improve Food security and Farmers Income in West Africa. In: Bationo A., Waswa B., Okeyo J.M., Maina F., Kihara J.,(eds.), Innovations as key to the Green Revolution in Africa – Vol .1, Springer, New York London. pp113-121.
- Tarawali S.A., Singh B.B., Gupta S.C., Tabo R., Harris F., Nokoe S., Fernández-Rivera S., Bationo A., Manyong V.M., Makinde K., Odion E.C., 2002. Cowpea as a key factor for a new approach to integrated crop–livestock systems research in the dry savannas of West Africa. In: Fatokun C.A., Tarawali S.A. Singh B.B., Kormawa P.M., Tamo M., (eds). Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production.

- Proceedings of the World Cowpea Conference III held at the International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria, 4–8 September 2000. IITA, Ibadan, Nigeria, pp 233-251.
- Thuita M.N., Okalebo J. R., Othieno C.O., Kipsat M.J., Bationo A., Sanginga N., Vanlauwe B., 2005. An attempt to enhance solubility and availability of phosphorus from phosphate rocks through incorporation of organics in western Kenya. African Crop Science Conference Proceedings, 7:1021-1027.
- Truong B., Pichot J., Beunard P., 1978. Caractérisation et comparaison des phosphates naturels tricalciques d'Afrique de l'Ouest en vue de leur utilisation directe en agriculture. Agronomie Tropicale, 33:136-145.
- Vanlauwe B., Dielsa J., Sanginga N., Carskya R.J., Deckersb J ., Merckxc R., 2000. Utilization of rock phosphate by crops on a representative toposequence in the Northern Guinea savanna zone of Nigeria: response by maize to previous herbaceous legume cropping and rock phosphate treatments. Soil Biology and Biochemistry, 32: 2079-2090.
- Vanlauwe B., Giller K.E., 2006. Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. Agriculture, Ecosystems and Environment, 116: 34–46.
- 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 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia, pp194-197.
- Walkley A., Black A., 1934. Etude de la méthode Degtjareff pour le dosage de la matière organique, modification apportée au dosage de l'acide chromique. Soil Science, 37:29-38.

- Wildemeersch J., 2014. Integrated biophysical and socio-economic evaluation of water and soil conservation techniques: a case study from Niger. Thèse de PhD. Université de Gand, Belgique. 179 p.
- Winterbottom R., Reij C., Garrity D., Glover J., Hellums D., Mcgahuey M., Scherr S., 2013. «Amélioration de la gestion des terres et de l'eau. » Document de travail, épisode 4 de Création d'un avenir alimentaire durable. Washington, DC: World Resources Institute. USA. 44 p.
- Woomer P.L., Tungani J.O., 2003. Light availability within an innovative maize-legume intercropping system in Western Kenya. African Crop Science Conference Proceedings, 6: 42-46.
- Woomer P.L., Langat M., Tungani J.O., 2004. Innovative Maize-Legume Intercropping Resultat in Above and Below-ground Competitive Advantages for Understorey Legumes. West African Journal of Applied Ecology, 6: 85-94.
- Woomer P. L., Huising J., Giller K. E., 2014. N2Africa Final Report of the First Phase 2009-2013, 138 p.
- Zapata F., Roy R.N., 2004. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. FAO Bulletin Engrais et Nutrition Végétale, N°13. 176 p.
- Zapata F., 2008. Introduction to nitrogen management in agricultural systems. Guidelines on Nitrogen Management in Agricultural Systems. Training Course Series No. 29 International Atomic Energy Agency, Vienna, pp 19-125.
- Zougmore R., Mando A., Stroosnijder L., 2011. Benefits of Integrated Soil Fertility and Water Management in Semi-arid West Africa: An Example Study in Burkina Faso. *In*: Bationo A. Waswa B., Okeyo J.M., Maina F., Kihara J.,(eds.), Innovations as key to the Green Revolution in Africa – Vol .1, Springer, New York London. pp 215-225.

ANNEXES

Annexe 1 : Analyse de variance des effets des fumures organo-minérales et des systèmes de culture sur le rendement en grain 2008 - 2009 à Sadoré

Source of variation	d.f.	2008	2009
		Fpr.	F pr.
rep stratum	2		
rep.*Units* stratum			
residu	2	<.001***	<.001***
engrais	2	<.001***	<.001***
fumier	2	<.001***	<.001***
culture	2	<.001***	<.001***
residu.engrais	4	0,043*	0,361ns
residu.fumier	4	0,052*	0,457ns
engrais.fumier	4	0,062ns	0,662ns
residu.culture	4	0,030*	0,050*
engrais.culture	4	0,089ns	0,938ns
fumier.culture	4	0,018**	0,207ns
residu.engrais.fumier	8	0,393ns	0,249ns
residu.engrais.culture	8	0,207ns	0,074ns
residu.fumier.culture	8	0,060ns	0,026**
engrais.fumier.culture	8	0,945ns	0,894ns
residu.engrais.fumier.culture	16	<.001***	0,512ns
Residual	160		
Total	242		

Annexe 2 : Analyse de variance des effets des fumures organiques, minérales et des systèmes de culture sur le rendement en paille 2008 - 2009 à Sadoré

Source of variation	d.f.	2008	2009
		F pr	F pr
rep stratum	2		
rep.*Units* stratum			
residu	2	<.001***	<.001***
engrais	2	<.001***	<.001***
fumier	2	<.001***	<.001***
culture	2	0,680ns	<.001***
residu.engrais	4	0,040**	0,023**
residu.fumier	4	0,861ns	0,457ns
engrais.fumier	4	0,723ns	0,949ns
residu.culture	4	0,121ns	0,018**
engrais.culture	4	0,668ns	<.001***
fumier.culture	4	0,513ns	0,288ns
residu.engrais.fumier	8	0,400ns	0,224ns
residu.engrais.culture	8	0,395ns	0,301ns
residu.fumier.culture	8	0,061ns	0,896ns
engrais.fumier.culture	8	0,176ns	0,931ns
residu.engrais.fumier.culture	16	0,022**	0,775ns
Residual	160		
Total	242		

Annexe 3: Analyse de variance des effets des fumures minérales, organiques et des systèmes de cultures sur le rendement en grain de mil à Kalapaté

Source of variation	d.f.	F pr.
Rep stratum	2	
Rep.*Units* stratum		
Technologie	4	<0,001***
Systèmes de Cultures	2	0,021**
Ann_e	1	0,014**
Technologie.Système de_Cultures	8	0.057ns
Technologie .Année	4	<0001***
Système de_Culture .Année	2	0,735ns
Technologie.SystèmeCultures.Année	8	0,927ns
Residual	58	
Total	89	

Annexe 4: Analyse de variance des effets des fumures minérales, organiques et des systèmes de cultures rendement en paille à Kalapaté

Source of variation	d.f	F pr.
Rep stratum	2	
Rep.*Units* stratum		
Technologies	4	<0,001***
Systèmes de Cultures	2	<0,001***
Année	1	0,027**
Technologies.Systèmes de Cultures	8	0,220ns
Technologies.Année	4	0,010***
Système de Cultures.Année	2	0,473ns
Technologie.Systèmes deCultures .Année	8	0,403ns
Residual	58	
Total	89	

Annexe 5 : Analyse de variance des effets des fumures minérales, organiques et des systèmes de cultures rendement en grain de niébé à Kalapaté

Variate: Grains_kg_ha

Source of variation	d.f.	F pr.
Rep stratum	2	
Rep.*Units* stratum		
Tech	4	<0,001
Syst_Cult	2	<0,001
Tech.Syst_Cult	8	0,002
Residual	28	
Total	44	

Annexe 6 : Analyse de variance des effets des fumures minérales, organiques et des systèmes de cultures rendement en fane de niébé à Kalapaté

Source of variation	d.f.	F pr.
Rep stratum	2	
Rep.*Units* stratum		
Technologies	4	0,006**
Systèmes de_Cultures	2	0,015**
Technologies.Systèmes de_Cultures	8	0,061ns
Residual	28	
Total	44	

Annexe 7 : Caractéristiques du mil (*Pennisetum Glaucum* (L.)R.Br.), variété HKP. (Source : ((CNEV) MAG, 2012))

<i>Pennisetum glaucum</i>		Mil
HKP		
DÉNOMINATION :	Haini Kiré Précoce	
NATURE GÉNÉTIQUE:	Population sélectionnée	
OBTENTEUR ET DATE D'OBTENTION:	INRAN, 1978	
PAYS ET DATE D'INSCRIPTION:	Niger, 1980	
MAINTENEUR :	INRAN	
ZONE DE PRODUCTION:	350-800 mm	
CYCLE SEMIS -MATURITÉ (50%):	75-90 jours	
HAUTEUR DE PLANTES À MATURITÉ:	190-200 cm	
APTITUDE AU TALLAGE:	Moyenne	
LONGUEUR DE LA CHANDELLE:	Intermédiaire	
POIDS DE 1000 GRAINS:	9-11 grammes	
RENDEMENT POTENTIEL:	1,5 à 2,5 t/ha	
AUTRES CARACTÈRES:	Légèrement sensible à la photopériode, Sensible au charbon et au mildiou, Peu sensible à la mineuse de l'épi.	



Annexe 8 : Caractéristiques du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variété TN5-78.
(Source :((CNEV) MAG, 2012))

<i>Vigna unguiculata</i>		Niébé
TN5-78		
DÉNOMINATION ET SYNONYMES :	Dan Louma, Jan waké, Jan nèra	
NATURE GÉNÉTIQUE :	Lignée	
OBTENTEUR ET DATE D'OBTENTION:	INRAN, 1978	
PAYS ET DATE D'INSCRIPTION:	Niger, 1984	
MAINTENEUR:	INRAN	
CYCLE SEMIS-MATURITÉ (50%):	75 jours	
TYPE DE FLORAISON:	Étalé	
PORT DES PLANTS:	Semi-Rampant	
COULEUR DES GRAINES:	Brune	
POIDS DE 100 GRAINS:	17-18 Gr	
RENDEMENT POTENTIEL:	2,5 t/ha	
RENDEMENT MOYEN	1,5 t/ha	
AUTRES CARACTÈRES:	Résistante au chancre bactérien, à la fonte des semis, à la pourriture des gosses et à la Septoriose ; Tolérance au striga ; Tolérance à la Sécheresse ; sensible puceron, trips et punaise; Bonne production de fourrage	

Annexe 9 : Caractéristiques du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variété K VX-30-309-6G. (Source :((CNEV) MAG, 2012))

Vigna unguiculata Niébé

K VX 30-309-6G

DÉNOMINATION ET SYNONYMES :	Dan Bobo
NATURE GÉNÉTIQUE :	Lignée
OBTENTEUR ET DATE D'OBTENTION:	INERA
PAYS ET DATE D'INSCRIPTION:	Niger, 1994
MAINTENEUR:	INRAN-INERA
CYCLE SEMIS-MATURITÉ (50%):	75 jours
TYPE DE FLORAISON:	Étalé
PORT DES PLANTS:	Semi-Rampant
COULEUR DES GRAINES:	Blanche
POIDS DE 100 GRAINS:	18 Gr
RENDEMENT POTENTIEL:	2 t/ha
RENDEMENT MOYEN	1 t/ha
AUTRES CARACTÈRES:	Résistante à la tache brune et au chancre bactérien ; Sensible à la Cercosporiose à la Septoriose et aux viroses ; Sensible aux Pucerons, aux Thrips et aux Bruches ; Sensible au striga ; tolérante à la sécheresse ; Bonne productrice de fanes ; Adaptée à la culture associée. Isohyète 300-800 mm.



Annexe 10 : Caractéristiques du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variété IT90K-372-1-2. (Source :((CNEV)MAG, 2012))

<i>Vigna unguiculata</i>		Niébé
IT90K-372-1-2		
DÉNOMINATION ET SYNONYMES :		
NATURE GÉNÉTIQUE :	Lignée	
OBTENTEUR ET DATE D'OBTENTION:	IITA, 1990	
PAYS ET DATE D'INSCRIPTION:	Niger, 2012	
MAINTENEUR:	INRAN, IITA	
CYCLE SEMIS-MATURITÉ (50%):	70 jours	
TYPE DE FLORAISON:	Étalé	
PORT DES PLANTS:	Semi-érigé	
COULEUR DES GRAINES:	Blanche	
POIDS DE 100 GRAINS:	18 grammes	
RENDEMENT POTENTIEL:	3 t/ha	
RENDEMENT MOYEN EN GRAINES:	1,5 tonnes/ha	
AUTRES CARACTÈRES:	Résistante au puceron, Sensible, aux Thrips et aux Bruches ; Sensible au Striga ; Résistante à la sécheresse ; Isohyète 300-600 mm.	