

Table des matières

Table des matières.....	i
Remerciements.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Sigles et abréviations.....	viii
Résumé.....	ix
Abstract	x
Introduction.....	1
Chapitre I: Généralités	4
I. La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique	4
I.1. Définition et importance	4
I.2. Facteurs influençant la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique.....	5
II. Le niébé	7
II.1. Description.....	7
II.2. Le niébé comme plante fixatrice d'azote atmosphérique	8
II.2. Importance du niébé dans les systèmes de culture	8
III. Mesure de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique	8
Chapitre II: Matériels et méthodes.....	11
I. Zone d'étude.....	11
I.1. Localisation.....	11
I.2. Types de sols et climat.....	12
I.3. Conditions socio-économiques des populations	12
II. Etude en station de recherche	13
II.1. Le dispositif expérimental pérenne de Saria.....	13
II.2. Echantillonnage de plantes, de sols et mesure de rendements.....	14
III. Etude en milieu paysan.....	14
III.1. Enquête agronomique	14
III.2. Echantillonnage de plantes, de sols et mesure de rendements.....	15
IV. Analyses de laboratoire	16
IV.1. Analyses de la composition isotopique de l'azote des échantillons de plantes	16
IV.2. Analyse chimique du sol et des plantes	16
V. Calcul des proportions d'azote provenant de l'atmosphère (Ndfa).....	16

VI.	Calcul de la quantité d'azote fixé et du Bilan partiel de l'azote.....	17
VII.	Analyses et test statistique effectués	17
Chapitre III: Résultats et discussion.....		19
I.	Propriétés chimique du sol, rendements, fixation et bilan partiels de l'azote	19
I.1	Investigations sur le dispositif pérenne de de Saria.....	19
I.1.1.	Effet des régimes de fertilisation sur les propriétés chimiques des sols (C, N total et P disponible)	19
I.1.2.	Effet des régimes de fertilisation sur les rendements et teneurs en azote du niébé	19
I.1.3.	Effet des régimes de fertilisation sur la composition isotopique de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) du niébé et des plantes de référence.....	20
I.1.4.	Effet des régimes de fertilisation sur la proportion d'azote du niébé provenant de l'atmosphère (Ndfa).....	21
I.1.5.	Effet des différents régimes de fertilisation sur la quantité d'azote atmosphérique fixé par le niébé	22
I.1.6.	Bilan partiel de l'azote	23
I.2.	Investigations en milieu paysan	24
I.2.1.	Diversité des pratiques paysannes.....	24
I.2.2.	Etat de fertilité des champs	29
I.2.3.	Rendements et teneurs en azote du niébé.....	30
I.2.4.	Composition isotopique de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) du niébé et des plantes de référence	31
I.2.5.	Proportion d'azote du niébé provenant de l'atmosphère (Ndfa).....	32
I.2.6.	Quantités d'azote fixé dans les champs	33
I.2.7.	Bilan en azote partiel des champs	34
I.3.	Discussion	35
I.3.1.	Modes de gestion des champs, caractéristiques chimiques des sols et rendements du niébé	35
I.3.2.	Composition isotopique de l'azote des plantes de référence et du niébé	37
I.3.3.	Proportions (Ndfa), quantité d'azote atmosphérique fixé et bilan partiel de l'azote	38
I.4.	Conclusion partielle.....	40
II.	Facteurs influençant la fixation du l'azote symbiotique de l'azote atmosphérique par le niébé	41
II.1.	Influence de la fertilisation et des propriétés chimiques des sols sur la fixation symbiotique de N par le niébé	41

II.2. Influence des modes de gestion des champs sur la fixation symbiotique de N par le niébé	42
II.3. Influence des paramètres de fertilité des sols et des modes de gestion des champs sur la fixation symbiotique de N chez le niébé.....	43
II.4. Discussion.....	45
II.5. Conclusion partielle.....	46
Conclusion générale	47
Références bibliographiques	49
Annexes.....	I
Annexe 1 : Description du Box-plot :	I
Annexe 2 : Coefficients de corrélations (r) et probabilité (p) entre les quantités de P et de N minéral apporté dans les champs, le C, N total et P résine des sol, le Ndfa (%), le N fixé, et les rendements graines et fanes des champs.	II
Annexe 3 : Fiche d'enquête utilisée en milieu paysan.....	III

Remerciements

Mes remerciements vont à toutes les personnes et organisations qui ont aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire de DEA, et particulièrement:

- Au Bureau de la Coopération Suisse au Burkina Faso (BUCO), pour avoir financé mon séjour d'études dans le groupe de nutrition des plantes de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (ETH-Z).
- A mes encadreurs à l'INERA, et de l'Institut du développement Rural, les professeurs. Michel Sedogo, François Lombo, et Hassan Bismarck Nacro. Leur confiance et leur disponibilité m'ont encouragé et permis de poursuivre une formation doctorale dont ce mémoire est la première étape;
- A mes encadreurs à l'ETH-Z, le professeur Emmanuel Frossard, et le Docteur Astrid Oberson. Leur suivi et leur encadrement scientifique ont été indispensables à la réalisation de ce mémoire ;
- Au Docteur Delwendé Innocent Kiba : Son aide précieuse et multiforme a facilité mon intégration dans le groupe de nutrition des plantes et a contribué à l'aboutissement de ce mémoire.
- A tous les membres du groupe de nutrition des plantes de l'ETH Zurich pour leur accueil et leur collaboration pendant mon séjour en Suisse.
- A tous les techniciens de la station de recherche agricole de l'INERA/Saria pour leur aide durant les travaux aussi bien en station de recherche qu'en milieu paysan
- A tous les vaillants paysans de la région de Saria, pour avoir accepté et participé activement à la conduite des travaux dans leurs champs.

Liste des figures

Figure 1: Plante de niébé en phase de floraison-initiation des gousses	7
Figure 2: Localisation du Burkina Faso en Afrique et de la zone d'étude dans la province du Bulkiemdé (Centre-Ouest du Burkina Faso).....	11
Figure 3: Pluviosité mensuelle et nombre de jour de pluie par mois mesuré dans la station de recherche de Saria en 2010	12
Figure 4: Plan des prélèvements de sol à la tarière dans les champs paysans	15
Figure 5: Pourcentage moyen d'azote du niébé provenant de l'atmosphère (Ndfa) sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de de Saria en 2009. Les bars d'erreur sont des déviations standards.....	22
Figure 6: Nombre de sarclages et de traitements insecticides effectués dans les champs paysans du centre oust du Burkina Faso sous culture de niébé en 2010	26
Figure 7: Quantités de N, de P et de K apportés par les engrains minéraux dans les champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de niébé.....	28
Figure 8 Teneurs en carbone, azote total et P disponible (résine) des sols de champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de variétés améliorées et locales de niébé....	29
Figure 9: Rendements graine et fanes mesurés sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de variétés améliorées et llocales de niébé.	30
Figure 10: Teneurs en azote des grains et des fanes de niébé mesurées sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso.	31
Figure 11: $\delta^{15}\text{N}$ des plantes de référence et de niébé mesurés sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso.	32
Figure 12: Proportions d'azote prélevé de l'atmosphère par les variétés améliorées et locales de niébé, mesurées sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso.....	33
Figure 13: Quantités d'azote atmosphérique fixé par les variétés améliorées et locales de niébé, mesurés sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso.	34

Figure 14: Bilan partiel de l'azote calculé sur des champs de variétés améliorées et locales de niébé, dans le Centre-Ouest du Burkina Faso	35
Figure 15: Effets des apports et des teneurs du sol en éléments (C, N total, et P disponible) sur la proportion d'azote provenant de l'atmosphère et sur la quantité d'azote fixé par le niébé.	42
Figure 16: Effet des modes de gestion des champs sur la proportion d'azote provenant de l'atmosphère et sur la quantité d'azote fixé par le niébé.....	43
Figure 17: Effet de l'ensemble des facteurs explicatifs sur la proportion d'azote provenant de l'atmosphère et sur les quantités d'azote fixés par le niébé.	44

Liste des tableaux

Tableau 1: Carbone et azote total, phosphore disponible et pH des sols sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009	19
Tableau 2: Rendements (matière sèche) et teneurs en azote des grains et fanes du niébé sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009.	20
Tableau 3: $\delta^{15}\text{N}$ moyen (%) des plantes de référence (adventices et sorgho) et du niébé sous différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009.	21
Tableau 4: Quantités d'azote atmosphérique fixé (en kg.ha ⁻¹) dans la biomasse aérienne du niébé sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009.	23
Tableau 5: Bilan partiel de l'azote dans le dispositif pérenne de gestion de la fertilité des sols de Saria (Centre-Ouest du Burkina Faso) sous culture de niébé en 2009.	24
Tableau 6: Types et nombres de variétés de niébé rencontrées dans les 33 champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso en 2010.	25
Tableau 7: Modes de travail du sol et précédents culturaux observés dans les champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de niébé en 2010 (nombre de champs = 33).	26
Tableau 8: Proportions de champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso selon la quantité moyenne de matière organique appliquée de 2005 à 2010	27
Tableau 9: Proportions de champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso selon la quantité d'engrais minéral NPK appliqués sous culture de niébé en 2010.....	27

Sigles et abréviations

BuCo : Bureau de la Coopération Suisse au Burkina Faso

IDR : Institut du Développement Rural

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

ETH-Z : Ecole polytechnique Fédérale de Zurich

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

Ndfa : proportion d'azote provenant de l'atmosphère (Nitrogen Derived From Atmosphere)

N : Azote

N₂ : Azote atmosphérique

P : Phosphore

C : Carbone

fmo : faible fertilisation minérale et organique

fm : faible fertilisation minérale

FMO : forte fertilisation minérale et Organique

FM : forte fertilisation minérale

Résumé

Le niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp) est l'une des principales cultures de rente pour les producteurs d'Afrique de l'Ouest où les systèmes agricoles sont caractérisés par des faibles teneurs en nutriments des sols et des apports limités de fertilisants. La capacité du niébé à fixer l'azote atmosphérique est donc d'une grande importance dans ces systèmes agricoles. Plusieurs facteurs peuvent influencer la fixation d'azote, notamment l'aspect variétale et les modes de gestion de la fertilité des sols qui peuvent s'avérer très diverses en milieu paysan. Les informations sur la variabilité de la fixation symbiotique de l'azote dans ces conditions sont donc nécessaires. Dans cette étude conduite dans la station de recherche agricole de l'INERA/Saria et dans 33 champs paysans situés dans la même zone pédoclimatique que la station de recherche, notre objectif était de déterminer les proportions et les quantités de N₂ fixé par le niébé en monoculture, sous une diversité de modes de gestion de la fertilité et de cultivars. La méthode de l'abondance naturelle en ¹⁵N a été utilisée avec comme plantes de références, des mauvaises herbes et des plantes de sorgho. Sur un essai de longue durée de la station de recherche agronomique de l'INERA Saria, les effets de divers régimes de fertilisation organique et/ou minérale sur la production et la fixation de N₂ d'une variété améliorée de niébé (KVX 396-4-5-2D) ont été étudiés. Sur les 33 champs paysans, la production de quatre variétés améliorées et deux variétés locales de niébé de même que la fixation de N₂ de ces variétés ont été étudiés. Des enquêtes ont fourni des informations sur les pratiques culturelles paysannes. Des échantillons de sol ont été prélevés à la profondeur 0-10 cm aussi bien sur le dispositif pérenne qu'en milieu paysan pour une caractérisation chimique (C, N total, P disponible, pH). Les résultats montrent que dans l'essai de Saria, les proportions d'azote provenant de l'atmosphère (Ndfa) chez le niébé ont varié de 24 à 49%, ce qui équivaut à entre 17,6 à 34,7 kg N ha⁻¹. Le Ndfa du niébé des champs paysans a varié de 22 à 92 %, et était en moyenne plus élevé dans les variétés locales (75,5%) que dans les variétés améliorées (63%). Les quantités d'azote fixé dans les champs paysans ont varié de 3 à 188 kg N ha⁻¹. Le bilan partiel de l'azote était positif dans la majorité des champs en milieu paysan. Des analyses de redondance canoniques ont montré que le Ndfa et la quantité de N₂ fixé par le niébé est sous l'influence de quantités de N et P apporté dans les champs, et de la teneur en N total et en P disponible du sol. La fixation symbiotique de l'azote par le niébé dans le centre ouest du Burkina Faso dépend des modes de gestion des terres qui influencent les teneurs en N et en P du sol, et des variétés cultivées.

Mots clés : Niébé; ¹⁵N ; Fixation de N ; Pratiques paysannes ; Fertilité du sol ; Burkina Faso.

Abstract

Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) is one of the major cash crops grown by smallholder farmers in West Africa, where farming systems are characterized by low soils nutrient contents and limited fertilizer inputs. Therefore, the ability of cowpea to fix atmospheric nitrogen is very important in these farming systems. Several factors can influence nitrogen fixation, including the varieties of cowpea grown and soil fertility management practices adopted by the farmers that can be very different on-farm. In this project conducted at the agricultural research station INERA/Saria, and on 33 farmer fields located in the same pedoclimatic area, we aimed to assess the proportions and amounts of N₂ fixed by cowpea cultivars grown using a diverse range of soil fertility management practices, using the ¹⁵N natural abundance method with weeds and sorghum plants as reference plants. In a field trial of the research station at Saria, the study used different organic and/or mineral fertilization systems to determine their impact on cowpea production and N₂ fixation of an improved variety (KVX 396 - 4-5-2D). On the farmers' fields, production as well as N₂ fixation of four improved and two local varieties of cowpea were studied. In addition, surveys provided information on farmer practices. Soil samples were also collected from the 0-10 cm horizon on the field trial of Saria and from farmers' fields for chemical characterization (C, total N, available P, and pH). In the field trial at Saria, the proportions of nitrogen derived from the atmosphere (Ndfa) in cowpea ranged between 24 - 49%, which was equivalent to 17.6 to 34.7 kg N ha⁻¹. The Ndfa of cowpea in the farmers' fields ranged from 22 to 92%, and was higher on average (75.5%) in the local varieties than in the improved varieties (63%). The amounts of fixed nitrogen in farmers' fields ranged from 3 to 188 kg N ha⁻¹. The partial nitrogen balance was positive in most of the farmers' fields. Canonical redundancy analysis showed that the Ndfa and amount of N₂ fixed by cowpea was influenced by amounts of N and P added to the fields and also by total soil N and available P. Cowpea nitrogen fixation depends on soil fertility management practices that influence soil N and P content, and the varieties of cowpea grown.

Key words: Cowpea, ¹⁵N; N fixation; farmer's practices; Soil fertility; Burkina Faso

Introduction

Le niébé est une culture importante pour les populations d'Afrique subsaharienne, du Burkina Faso en particulier. Dans le Centre-Ouest du Burkina Faso, le niébé est très souvent cultivé en association ou en rotation avec les céréales comme le sorgho ou le petit mil. La production mondiale du niébé s'estime à environ 3,3 millions de tonnes dont 75% serait produite en Afrique, principalement dans les régions de savane aride et semi-aride (Odendo et al., 2011). Le niébé occupe une superficie d'environ 9,3 millions d'hectares en Afrique de l'ouest et du Centre, principalement au Nigeria et au Niger qui sont les premiers producteurs mondiaux (Bationo et al., 2011). La production de niébé au Burkina Faso a atteint 537680 tonnes en 2009, et les superficies cultivées en monoculture étaient estimées à 119492 ha (INSD, Site internet consulté le 01 Novembre 2012).

Le niébé joue un rôle essentiel dans la vie de millions de personnes en Afrique subsaharienne où il est une source majeure de protéines pour les hommes et le bétail. Il est très présent dans les habitudes alimentaires des populations et joue un important rôle nutritionnel pour les populations, grâce à sa richesse en protéines. Traditionnellement cultivé pour ses graines, les jeunes feuilles et les gousses fraîches du niébé sont également consommées dans la plupart des régions d'Afrique où il est cultivé (Timko et al., 2007). Les fanes du niébé qui constituent un fourrage de qualité pour les animaux (Singh et al., 2003), sont généralement exportées des champs et utilisées pour nourrir le bétail. Le niébé a ainsi une place importante dans l'économie des petites exploitations agricoles où il est cultivé, pour ses graines et ses feuilles. La production du niébé permet aux exploitations de disposer de revenus pour acheter les céréales (Zoundi et al., 2007) pendant les périodes de soudure.

La culture du niébé est cependant soumise à des contraintes liées à la faible fertilité des sols. L'agriculture sur ces sols est essentiellement pratiquée par des petites exploitations paysannes, qui pratiquent une agriculture de subsistance à faibles apports de fertilisants minéraux et organiques. Les lixivisols (sols ferrugineux tropicaux lessivés) qui prédominent dans cette région sont caractérisés par leurs faibles teneurs en matière organique. Les lixivisols ont des faibles teneurs en azote total avec des valeurs généralement inférieures à 0,1% (Pallo et al, 2009) et surtout en phosphore total et disponible.

Sur le plan agronomique, le niébé est connu comme ayant des effets bénéfiques sur la fertilité des sols et les rendements des cultures subséquentes grâce sa capacité à fixer l'azote atmosphérique par une symbiose avec les *Rhizobiaceae* du sol (Vance, 2001).

Les effets bénéfiques du niébé sur la fertilité des sols et la production agricole ont été montrés dans de nombreuses études par différentes méthodes. Les travaux de Bagayoko et al. (2000) ; Buerkert et al. (2002) et Jemo et al. (2006) ont montré le rôle bénéfique de la culture des légumineuses sur la fertilité du sol et les rendements des céréales subséquentes. D'autres travaux mesurant les quantités d'azote fixé par cette légumineuse en milieu contrôlé (Bado et al., 2008 ; Belane et al., 2011) et en milieu paysan (Naab et al., 2009) ont abouti à des résultats variables en fonction des facteurs principaux (variétés cultivé, fertilisations pratiquées, champs paysans étudiés...).

Les pratiques paysannes influence la productivité de sols (Kiba, 2012) et certainement la fixation symbiotique de N chez le niébé qui, comme montré dans plusieurs travaux (Bado et al., 2006 ; Vesterager et al., 2008), dépend de l'état de fertilité et des modes de gestion de la fertilité des sols. Une approche intéressante serait d'étudier la fixation symbiotique de N sous des pratiques homogènes et constantes de gestion de la fertilité des sols, et de pouvoir comparer celle-ci avec des résultats en milieu paysan, dans des conditions pédoclimatiques similaires. Le dispositif expérimental pérenne sur l'entretien de la fertilité des sols installé depuis 1960 sur un lixisol dans le centre ouest du Burkina Faso, offre cette possibilité. En effet la rotation sorgho-niébé pratiquée sur ce dispositif serait une bonne situation de référence pour mieux comprendre les effets des pratiques paysannes de gestion de la fertilité des sols sur la fixation symbiotique de N₂ par le niébé en Afrique Subsaharienne, et plus particulièrement au Burkina Faso. En outre la méthode de l'abondance naturelle en isotope ¹⁵N, peu destructive, est facile à appliquer en plein champ et permet une estimation précise des proportions et des quantités de N₂ fixée par les légumineuses.

Dans cette étude qui a pour thème « **Etude de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par le niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp) avec la méthode de l'abondance naturelle en ¹⁵N sous diverses pratiques culturales dans le Centre-Ouest du Burkina Faso** », l'objectif principal est de déterminer par la méthode de l'abondance naturelle en ¹⁵N les proportions et les quantités de N fixées par divers cultivars de niébé sous une diversité de modes de gestion de la fertilité des sols. Les objectifs spécifiques de notre étude sont les suivants :

- Mesurer dans des conditions pédoclimatiques similaires, les proportions et les quantités d'azote fixé par le niébé sous différents modes de gestion de la fertilité des sols sur un dispositif pérenne et sur des champs paysans;

- Identifier les facteurs influençant les proportions et les quantités d'azote atmosphérique fixées par le niébé, sur les lixisols sous différentes pratiques agricoles en Afrique subsaharienne et plus particulièrement au Burkina Faso.

Dans cette étude, nous faisons l'hypothèse que : (1) La proportion d'azote provenant de l'atmosphère (Ndfa) du niébé sera plus élevée dans les champs ayant les plus faibles teneurs en azote du sol, car les plantes seront plus dépendantes de l'azote atmosphérique pour assurer leur nutrition azotée ; (2) La quantité d'azote atmosphérique fixé par le niébé sera supérieure dans les champs ayant les teneurs plus élevées en phosphore disponible et en azote total du sol car elle est fonction de la production totale de biomasse qui serait limitée par la disponibilité en ces nutriments ; (3) Les proportions d'azote provenant de l'atmosphère seront plus élevées chez les variétés locales que chez les variétés améliorées, car ces dernières seraient mieux adaptées aux souches *Rhizobiaceae* du sol.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre traite de généralités sur le niébé et sur la fixation symbiotique de l'azote. Le deuxième chapitre présente les matériels et méthodes utilisés. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats et discussions qu'ils suscitent, et enfin sont présentées la conclusion et les perspectives de recherche.

Chapitre I: Généralités

I. La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique

I.1. Définition et importance

La fixation biologique de l'azote atmosphérique est le processus par lequel un certain nombre d'espèces de bactéries utilisent l'enzyme nitrogénase pour convertir l'azote moléculaire N₂ en ammoniac, une forme d'azote qui peut ensuite être incorporée dans les composantes organiques tels que les acides nucléiques des bactéries et des plantes associées (Unkovick et al., 2008). La fixation biologique de l'azote comprend les systèmes fixateurs de N₂ comprenant les microorganismes libres composés de bactéries hétérotrophes et de cyanobactéries. Elle est qualifiée de fixation symbiotique lorsqu'elle est réalisée en association entre les légumineuses et des bactéries du sol appartenant à la famille des *Rhizobiaceae*. Les bactéries du genre *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium* (etc.) sont les plus souvent impliquées dans cette fixation symbiotique. Après la photosynthèse, la fixation symbiotique est probablement le plus important processus biologique de dimension planétaire (Unkovich et al., 2008). Dans la suite de notre travail, nous utiliserons le terme «*Rhizobiaceae*» pour désigner l'ensemble des bactéries effectuant des symbioses fixatrices avec des légumineuses.

Globalement, la fixation symbiotique entre les *Rhizobiaceae* et les légumineuses serait de l'ordre de 20 à 22 millions de tonnes d'azote par an. La plus grande partie de cette fixation (de l'ordre de 16 millions de tonnes par an) provient du soja (Herridge et al., 2008) qui est la légumineuse la plus cultivée dans le monde. La fixation globale due au niébé serait d'environ 0,23 millions de tonnes d'azote par an (Herridge et al., 2008). La fixation symbiotique de l'azote est le processus le moins couteux et le plus écologique, permettant de fournir de l'azote aux systèmes de culture (Vieira et al., 2010), spécialement lorsque les légumineuses fixatrices sont utilisées comme engrais vert. Même si les graines et une grande partie des fanes sont exportées lors de la culture traditionnelle des légumineuses à graines comme le niébé, une partie non négligeable de feuilles et des parties souterraines est recyclée dans le sol (Bado et al., 2008). La culture des légumineuses permet ainsi de sauvegarder, voir améliorer le niveau d'azote des sols. La faible teneur en azote dans les sols, qui est un facteur commun en Afrique de l'Ouest pourrait ainsi être améliorée à moindre coût par l'exploitation de cette capacité des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique.

I.2. Facteurs influençant la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique

I. 2.1. La température

Des températures trop fortes au niveau du système racinaire affectent l'infection des racines par les bactéries et la fixation symbiotique de l'azote chez plusieurs espèces de légumineuses. Les températures élevées retardent la nodulation et la situent en profondeur, réduisent ou inhibent l'activité de la nitrogénase et la fixation symbiotique (Zahran, 1999). La sensibilité des *Rhizobiaceae* aux températures élevées dépend de la souche. Les *Rhizobiaceae* des régions sahélo-soudanaises chaudes et sèches d'Afrique de l'ouest croissent à 37°C et plus de 90% d'entre elles survivent également à 40°C (Sadowsky, 2005). Les *Bradirhizobium* ont ainsi une tolérance plus grande aux températures élevées que les *Rhizobium*. L'activité symbiotique chez le niébé a une tolérance relativement élevée aux fortes températures. La température critique pour la fixation symbiotique chez cette légumineuse est l'une des plus élevée et se situerait entre 35 et 40°C (Michiels et al., 1994).

I.2.2. L'eau et le stress hydrique

La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par les légumineuses est très sensible au manque d'eau. Une grande variété de légumineuses tempérées et tropicales présentent une réduction de fixation lorsqu'ils sont soumis à un stress hydrique (Zahran, 1999). La réponse de la fixation au stress hydrique dépend cependant du stade de croissance de la plante, et est plus prononcée pendant la période de croissance végétative (Zahran, 1999). La concentration et l'efficacité d'utilisation du P dans les nodules diminuent avec la teneur en eau sol et des racines (Zahran, 1999).

I.2.3. Le pH du sol

La plupart des légumineuses ont besoin d'un pH neutre ou légèrement acide pour bien croître et réaliser la fixation symbiotique de l'azote. Les souches de *Rhizobiaceae* ont une diversité de réaction par rapport au pH du sol. La majorité d'entre elles vivent dans un pH compris entre 6 et 7, et peu survivent et se développent dans un pH compris entre 4,5 et 5 (Sadowsky, 2005). Les souches de *Rhizobiaceae* à croissance rapide sont généralement moins tolérantes à l'acidité du sol que celles à croissance lente. En effet les souches de *Bradirhizobium* sont généralement plus tolérantes aux conditions de pH acide que les celles de *Rhizobium* (Zahran, 1999 Sadowsky, 2005). La tolérance de certaines souches de *Rhizobiaceae* aux conditions d'acidité du sol serait liée à leur capacité à maintenir un pH intracellulaire proche de la neutralité (Sadowsky, 2005).

I.2.4. Le phosphore et l'azote du sol

Le phosphore est l'un des nombreux éléments qui affectent les rendements et la fixation symbiotique de l'azote chez les légumineuses. Avec l'azote, il est le premier facteur limitant les rendements dans de nombreuses régions d'Afrique. Les légumineuses ont des besoins plus importants en phosphore comparativement aux autres plantes (Sadowsky, 2005). La faible disponibilité en phosphore du sol est une contrainte majeure pour la croissance et la fixation symbiotique d'azote chez les légumineuses car les nodules ont des besoins élevés en phosphore et leur croissance est souvent limitée par cet élément (Vance, 2001, Jemo et al., 2006). Le manque de phosphore dans le sol réduit le nombre et la masse des nodules ainsi que l'activité de la nitrogénase des légumineuses (Qiao et al., 2007). Les souches de *Rhizobiaceae* diffèrent dans leur tolérance au manque de phosphore. Les souches à croissance lente telles que les *Bradirhyobium* sont plus tolérantes au manque de phosphore que celles à croissance rapide (Zahran, 1999). En réponse aux faibles teneurs en P du sol, les légumineuses accroissent la densité et la surface d'absorption des racines ainsi que les sécrétions d'acides citriques (Vance, 2001) dans la rhizosphère pour augmenter la solubilisation des formes peu disponibles de P du sol. L'application de doses croissantes de phosphore entraîne une augmentation de la production de biomasse nodulaire et de la fixation symbiotique chez le niébé (Jemo et al 2006).

Les apports d'azote sous forme de fertilisants sont souvent nécessaires pour permettre un rendement adéquat des légumineuses. Cependant, les apports excédant la « dose starter » ont généralement un effet inhibiteur sur la fixation d'azote (Zahran, 1999). De nombreux auteurs (Cheema et Ahmad 2000 ; Salvagiotti et al., 2008) ont mis en évidence une réduction de la fixation symbiotique d'azote, fonction des doses d'azote apportées, surtout par l'engrais minéral. Les nitrates ont un effet inhibiteur plus important sur la fixation symbiotique d'azote comparativement à l'ammonium (Cheema et Ahmad, 2000). La teneur en azote disponible du sol influence également la fixation symbiotique d'azote par les légumineuses. De manière générale, les fortes teneurs d'azote du sol réduisent la nodulation et la fixation d'azote (Zahran, 1999).

II. Le niébé

II.1. Description

Le niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp) (figure 1) est une légumineuse herbacée tropicale de la famille des Fabacées originaire d'Afrique (Timko et al., 2007). Les tiges sont cylindriques, et contorsionnées présentent différents ports. Selon la variété on distingue principalement les ports rampant et les ports érigé. Les deux premières feuilles sont opposées, sessiles et entières. Les feuilles sont ensuite alternes, pétiolées et trifoliolées. Son système racinaire comprend une racine pivotante lui permet d'explorer le sol en profondeur. Les racines portent des nodules qui renferment des bactéries fixatrices d'azote. Le niébé a une grande tolérance aux fortes températures et à la sécheresse comparativement à d'autres légumineuses (Hall 2004) et de ce fait est bien adapté aux régions arides et semi-arides d'Afrique où se concentre en grande partie sa production. De nombreuses variétés locales ou améliorées de niébé sont rencontrées dans le plateau central du Burkina Faso. En général les variétés locales sont rampantes, tandis que les variétés améliorées sont de port érigé ou semi érigé, et présentent des caractéristiques de résistance aux maladies et/ou aux insectes.

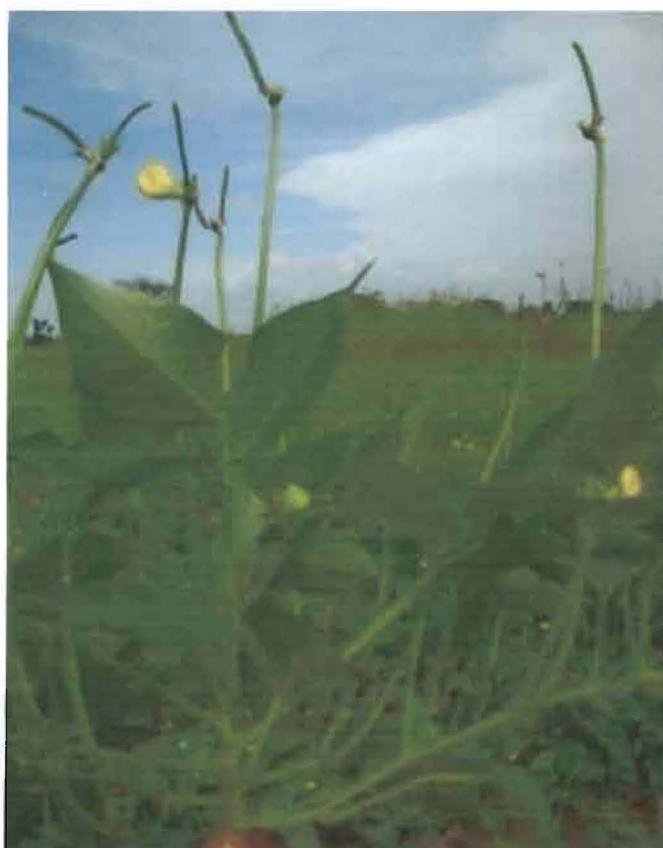


Figure 1: Plante de niébé en phase de floraison-initiation des gousses

II.2. Le niébé comme plante fixatrice d'azote atmosphérique

Le niébé entre en symbiose avec plusieurs espèces de Rhizobiums dont les plus importants sont les *Bradyrhizobium*. Plusieurs études ont porté sur la fixation de l'azote atmosphérique par le niébé en Afrique. Nombreuses d'entre elles ont été faites en milieu contrôlé ou en station de recherche. Peoples et al. (2009) indiquent qu'en Afrique, le niébé tirerait entre 15 et 89% de ses besoins en azote de la fixation symbiotique, et en moyenne 63 kg N.ha^{-1} sont fixés en considérant seulement la partie aérienne de la plante. En mesurant la fixation de l'azote par 30 variétés de niébé provenant de diverse régions d'Afrique, Belane et Dakora (2010) ont trouvé des Ndfa de 64 à 86% correspondant à entre 49 et 178 kg N.ha^{-1} de N fixé pour la partie aérienne des plantes, par la méthode de l'abondance naturelle. Par la même méthode, Belane et al. (2011) comparant la fixation symbiotique de l'azote sur 32 variétés de niébé d'Afrique australe, ont trouvé des Ndfa significativement différentes entre elles et allant de 50 à 81% selon les variétés. Dans une enquête sur 63 champs paysans dans la région Nord-ouest du Ghana, Naab et al. (2009), utilisant la méthode de l'abondance naturelle ont trouvé qu'entre 12 et 99% de l'azote de la partie aérienne du niébé provenaient de l'atmosphère. La capacité du niébé à fixer l'azote atmosphérique dépend ainsi des facteurs tels que la variété, les conditions climatiques (Nyemba et Dakora, 2010) et des conditions de fertilisation du champ (Bado et al., 2008).

II.3. Importance du niébé dans les systèmes de culture

Le niébé joue un rôle important dans le maintien de la productivité des sols cultivés. Il a été souvent observé que parmi les légumineuses couramment utilisées, le niébé semble être le meilleur précédent cultural (Bado et al., 2008). Un précédent niébé dans une rotation permet une augmentation très significative des rendements de la céréale, comparativement à la monoculture de céréale (Bagayoko et al., 2000; Bado, 2002). Les légumineuses améliorent la disponibilité de l'azote aux cultures subséquentes comparativement aux céréales et ce, grâce à une meilleure minéralisation de leurs résidus et une plus grande libération d'azote minérale (Douxchamps et al., 2010). Un précédent niébé augmenterait l'azote prélevé par le sorgho de 35% comparativement à la monoculture (Bado et al., 2008).

III. Mesure de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses parmi lesquelles on peut citer:

La méthode de la différence d'azote total dans laquelle la quantité d'azote fixé est estimée comme étant égal à la différence d'azote total entre la plante fixatrice et une plante non fixatrice utilisée comme référence. La principale limite de cette méthode est le fait qu'elle assume que les plantes fixatrices et non fixatrice d'azote atmosphérique ont les mêmes besoins en N, ce qui est très contestable.

La méthode de la réduction de l'acétylène qui est basée sur le principe de la réduction de l'acétylène en éthylène par l'enzyme nitrogénase pour mesurer la fixation symbiotique de l'azote. Les limites de cette méthode sont qu'elle n'est pas applicable en plein champ, et nécessite la destruction de la plante entière pour extraire les racines et les nodosités racinaires de la légumineuse.

Actuellement les techniques les méthodes isotopiques, basées sur la différence de composition isotopique (rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) entre l'atmosphère et le milieu de culture (Unkovich et al., 2008), sont les plus utilisées car elles donnent des résultats plus précis. Parmi ces méthodes on peut citer :

La méthode de dilution isotopique : dans laquelle le sol est enrichi en isotope ^{15}N par un marqueur. La fixation de l'azote est ensuite mesurée en comparant l'excès de ^{15}N dans la plante fixatrice et dans une plante non fixatrice utilisée comme plante de référence. La contrainte de cette méthode est la nécessité d'appliquer de façon très homogène l'azote enrichi en ^{15}N , et que la plante de référence et la plante fixatrice aient reçu les mêmes quantités.

La méthode de l'abondance naturelle en ^{15}N est celle que nous utilisons dans cette étude. L'atmosphère terrestre est composée d'environ 78% d'azote. Cet azote est constitué très majoritairement d'atomes de masse 14 (^{14}N), avec de 7 protons et 7 neutrons. Cependant l'atmosphère a une abondance naturelle en l'isotope ^{15}N (à 8 neutrons) de 0,3663% (Hardarson et Danso, 1993). De très légères variations nommées δ (Equation 1), de cette abondance naturelle peuvent se produire dans les fractions d'azote de la biosphère (Hogberg, 1997).

$$\text{Equation 1: } \delta^{15}\text{N} (\%)_{\text{échantillon}} = (\%^{15}\text{N}_{\text{échantillon}} - \%^{15}\text{N}_{\text{atmosphère}}) / \%^{15}\text{N}_{\text{atmosphère}} \times 1000$$

Le sol a un $\delta^{15}\text{N}$ positif car enrichi en ^{15}N par les processus de discrimination biochimique et biologique qui ont lieu dans le sol (Hogberg, 1997). Alors que celui de l'atmosphère est égal 0 par définition. De ce fait, sur un même sol, le $\delta^{15}\text{N}$ d'une plante fixatrice d'azote

atmosphérique est inférieur à celui d'une plante non fixatrice, car dilué par le N de l'atmosphère. Le pourcentage d'azote atmosphérique fixé par la légumineuse (%Ndfa) peut ainsi être calculé en utilisant le $\delta^{15}\text{N}$ de la légumineuse et celui d'une plante de référence non-fixatrice ayant évolué en même temps dans les mêmes conditions édaphiques en appliquant l'équation 2 (Unkovich et *al.*, 2008):

$$\text{Equation 2: } \% \text{ Ndfa} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{légumineuse}}) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - B) \times 100$$

La valeur B représente le $\delta^{15}\text{N}$ de la légumineuse ayant poussé dans les conditions contrôlées en absence totale d'azote, donc qui n'a bénéficié que de l'azote de l'air pour sa croissance.

La méthode de l'abondance naturelle en ^{15}N a un certain nombre d'avantages. Elle est applicable aussi bien en milieu contrôlé sous serre qu'en champ expérimental. Elle permet également une mesure de la fixation symbiotique de N_2 dans toutes les situations où la plante fixatrice et non fixatrice, poussent simultanément. Elle peut donc être appliquée dans les champs en milieu paysan (Unkovich et *al.*, 2008). Cependant elle doit tenir compte de certaines exigences telles que le choix adéquat de la plante non-fixatrice de référence et de la valeur B.

Chapitre II: Matériels et méthodes

I. Zone d'étude

I.1. Localisation

L'étude a été conduite dans le Centre-Ouest du Burkina (figure 2). Les activités ont été conduites dans la station de recherche de l'Institut National de l'environnement et de Recherches Agricoles basée à Saria (INERA/Saria). Les coordonnées géographiques de la station de Saria sont : 12°16'N, 2°9'W, et 300m d'altitude. Un dispositif pérenne implanté depuis 1960 dans la station de recherche et des champs paysans situés autour de cette station ont servi à notre étude.

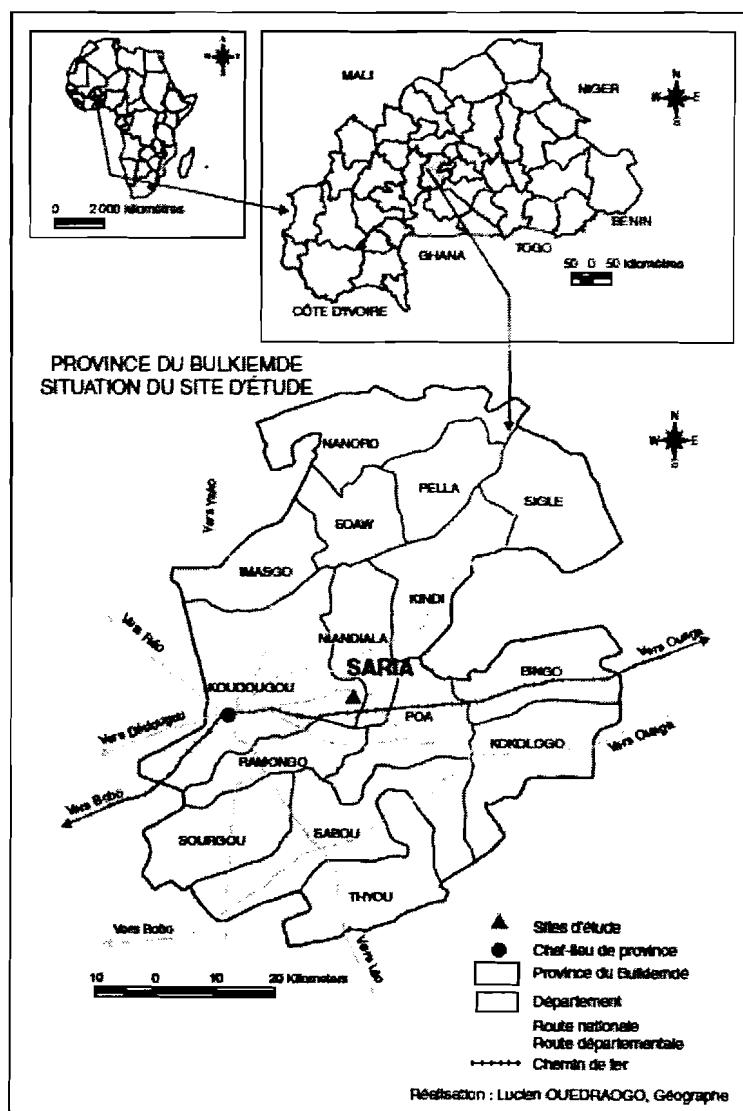


Figure 2: Localisation du Burkina Faso en Afrique et de la zone d'étude dans la province du Bulkiemdé (Centre-Ouest du Burkina Faso)

I.2. Types de sols et climat.

Les sols de la région de la zone d'étude sont à majorité classés comme des Lixisols (FAO, 2006), ou sols ferrugineux tropicaux lessivés (classification française). Ils sont caractérisés par leurs teneurs très faibles en nutriments (Lombo et al., 2009) et leur structure très fragile. L'horizon supérieur de ces sols présente de faibles teneurs en carbone (environ 11 g.kg⁻¹) en azote total (environ 0,9 g.kg⁻¹) (Pallo et al., 2009).

Le climat est de type Nord-soudanien (Fontes. et Guinko. 1995) avec une pluviosité annuelle allant de 700 à 900 mm réparti entre 4 et 5 mois. En 2009 la pluviosité enregistrée sur la station de Saria a été de 906 mm reparti sur 63 jours. En 2010 la station de recherche a enregistré une pluviométrie de 981 mm répartie sur 80 jours (figure 3).

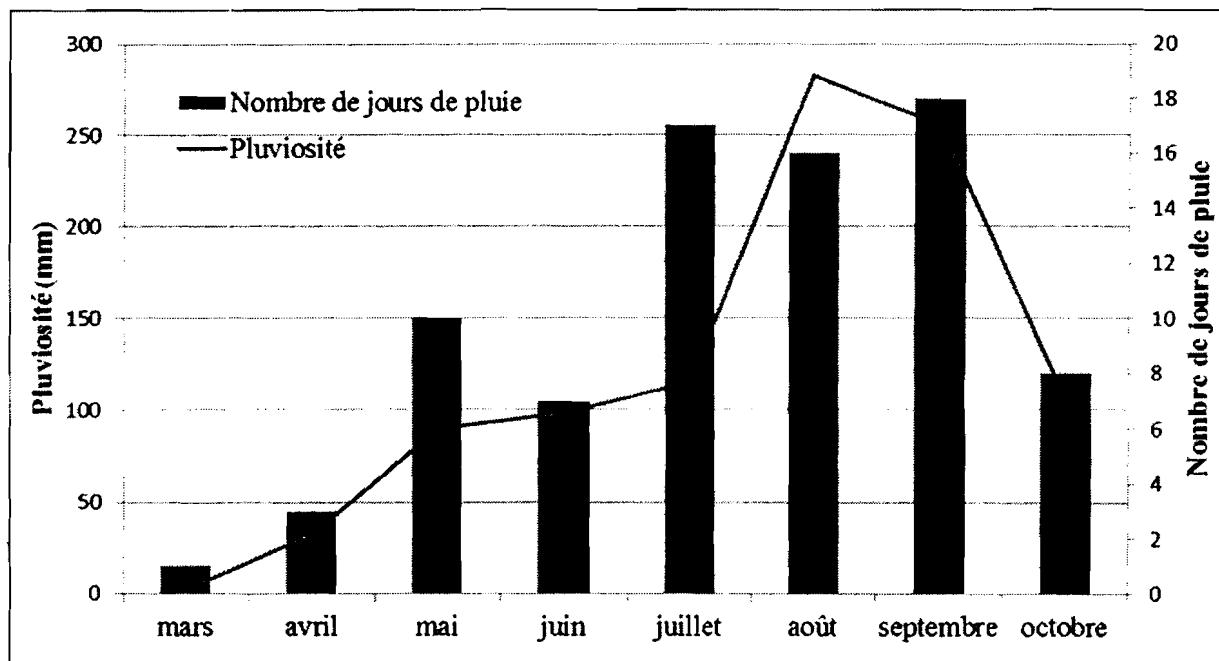


Figure 3: Pluviométrie mensuelle et nombre de jour de pluie par mois mesuré dans la station de recherche de Saria en 2010

I.3. Conditions socio-économiques des populations

Les ménages agricoles dans la zone ont déjà fait l'objet d'une étude sur leurs conditions socioéconomiques et leurs stratégies de gestion de la fertilité des sols pendant la campagne agricole 2009 (Traore, 2010). L'agriculture pluviale et l'élevage sont les principales activités économiques des ménages. Ces deux activités occupent respectivement 100% et 97% des ménages. L'activité d'élevage est essentiellement basée sur celle de petits ruminants et de volaille, et ne permet pas l'obtention de fumure organique en quantité suffisante pour les champs. Ces ménages ont des conditions économiques relativement modestes. Plus de 72%

des ménages étudiés sont en dessous du niveau moyen mensuel de dépense des ménages Burkinabé, et plus 60% d'entre eux reçoivent une assistance financière de la part de parents vivant en ville ou à l'étranger. Le niveau d'équipement agricole de ces ménages est assez réduit, et constitué essentiellement d'outils aratoires manuels, ou à traction animale pour les mieux nantis. D'une manière générale, les quantités de fertilisants organiques et minéraux appliquées dans les champs sont faibles.

II. Etude en station de recherche

II.1. Le dispositif expérimental pérenne de Saria

L'étude a été conduite en 2009 dans un essai de longue durée dans la station de recherche de l'INERA/Saria. L'essai de Saria est implanté depuis 1960, et compare les effets à long terme de 6 régimes de fertilisation qui sont :

- le **témoin** sans aucune fertilisation ;
- Le **fmr**: apport annuel de 33 kg N, 10 kg P et 11 Kg K ha^{-1} sous forme d'engrais minéral et une restitution de la paille du sorgho chaque deux ans;
- Le **fmo**: apport annuel de 33 kg N, 10 kg P et 11 Kg K ha^{-1} sous forme d'engrais minéral et une dose de 5 tha^{-1} de fumier;
- Le **fm**: apport annuel de 33 kg N, 10 kg P et 11 Kg K ha^{-1} sous forme d'engrais minéral;
- Le **FMO**: apport annuel de 56 kg N, 10 kg P et 26 Kg K ha^{-1} sous forme d'engrais minéral et 40 tha^{-1} de fumier tous les deux ans;
- Le **FM**: apport annuel de 56 kg N, 10 kg P et 26 Kg K ha^{-1} sous forme d'engrais minéral

Les engrains minéraux apportés sont essentiellement l'urée, l'engrais complexe NPK et le chlorure de potassium (KCl). Par ailleurs trois types de rotations sont également étudiés sur l'essai. Ce sont: (i) sorgho-sorgho; (ii) sorgho-coton et (iii) sorgho-niébé. Le fumier apporté tous les deux ans dans les traitements fmo et FMO concerne seulement l'année de culture du sorgho. En 2009 la variété de niébé KVX-396-4-5-2D a été cultivée dans l'essai. Dans cette étude nous nous sommes intéressés seulement à la rotation sorgho-niébé et nous n'avons pas considéré le traitement fmr.

II.2. Echantillonnage de plantes, de sols et mesure de rendements

En 2009 le niébé était cultivé sur la rotation Sorgho-niébé. Sur les parcelles des traitements Témoin, fm, fmo, FM et FMO, du sorgho a été exceptionnellement semé sur les quatre angles de chaque parcelle utile pendant la période de semis du niébé. Les plants de sorgho ainsi obtenus ont été épargnés de-même que les mauvaises herbes graminées aux alentours de ces quatre angles pendant les opérations de sarclage.

A la période floraison-initiation des gousses de niébé, les plants de Sorgho et/ou de mauvaises herbes ayant poussé dans les quatre angles de chaque parcelle utile ont été échantillonné séparément pour servir de plantes de référence. La biomasse aérienne (comprenant feuilles tiges fleurs et gousses) d'une plante de niébé a été échantillonnée dans les quatre angles de chaque parcelle utile. Les couples d'échantillons de plantes niébé-mauvaise herbe ainsi obtenus pour les 4 angles de chaque parcelle élémentaire ont été séchés à température ambiante et conditionnés pour l'analyses de leur composition isotopique en ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$).

Des prélèvements de sols à la tarière ont été effectués en 5 points de chaque parcelle utile sur la profondeur 0-10 cm. Un échantillon composite constitué du mélange des 5 prélèvements a été prélevé. A la récolte, les rendements ont été mesurés dans les parcelles en rapportant la production à la surface de chaque parcelle utile, puis des échantillons de graines et de fanes ont été prélevés pour l'analyse de leurs teneurs en azote.

III. Etude en milieu paysan

III.1. Enquête agronomique

En 2010 l'étude a été menée sur 33 champs paysans de niébé en monoculture tous situés dans un rayon de 10 Km de la station de recherche de Saria.

Une enquête a été conduite auprès des paysans propriétaires des champs étudiés. Chaque producteur a été questionné sur les formes et les quantités de fertilisants apportées dans son champ durant la campagne agricole 2010 et les cinq années précédentes. Les informations sur la variété de niébé cultivée, le précédent cultural des cinq dernières années et les problèmes spécifiques liés au champ ont également été recueillies. Ces enquêtes ont été complétées par des observations faites sur le champ. Ces observations ont concerné la vérification des variétés cultivées, l'appréciation d'ensemble du champ et des problèmes particuliers tels que l'enherbement et les ravages d'insectes ou d'animaux.

III.2. Echantillonnage de plantes, de sols et mesure de rendements

Dans les champs paysans, une placette de 32 m^2 ($8\text{m} \times 4\text{m}$) correspondant à la superficie de la parcelle utile dans l'essai de Saria a été installée sur chaque champ avant le premier sarclage. Dans les quatre angles de chaque placette, un espace d'environ $0,1 \text{ m}^2$ a été délimité. Les mauvaises herbes poussant dans cette espace ont été épargnées par les paysans pendant les opérations de sarclage.

A la période floraison-initiation des gousses du niébé, les plantes de mauvaises herbes graminées ayant poussé dans les quatre angles de la placette ont été échantillonnés pour servir de plante de référence. Pour un même champ, la même espèce de mauvaise herbe a été retenue. La biomasse aérienne (comprenant feuilles tiges fleurs et gousses) d'une plante de niébé a été échantillonnée. Les couples d'échantillons de plantes niébé-mauvaise herbe ainsi obtenus pour les 4 angles de la placette ont été séchés à température ambiante, et conditionnés pour les analyses de $\delta^{15}\text{N}$.

Les prélèvements de sol à la tarière ont été effectués à l'intérieur de la placette sur la profondeur 0-10 cm avant le premier sarclage du champ. Pour tenir compte de l'hétérogénéité, 10 prélèvements distribués à l'intérieur de la placette ont été faites (figure 4). Un échantillon composite a été réalisé en mélangeant les 10 prélèvements pour chaque champ. La récolte du niébé a été effectuée à l'intérieur de la placette en un ou deux passages selon l'état de maturité des gousses. Les rendements grains et fanes ont été calculés après le dernier passage en rapportant la production à la superficie de la placette. Des échantillons de grains et de biomasse aérienne ont également été prélevés et séchés au soleil pour l'analyse de leurs teneurs en azote.

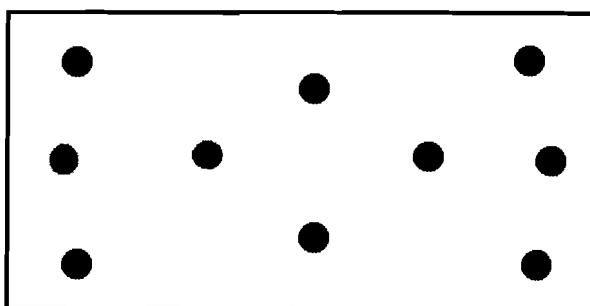


Figure 4: Plan des prélèvements de sol à la tarière dans les champs paysans

IV. Analyses de laboratoire

IV.1. Analyses de la composition isotopique de l'azote des échantillons de plantes

Les échantillons de niébé, de mauvaises herbes et de sorgho prélevés à la période floraison-initiation des gousses ont été broyés très finement et analysés pour la détermination de leurs teneurs en azote et de leur abondance naturelle en ^{15}N . Entre 1 et 4 mg de plante broyé ont été encapsulé et introduit dans un spectromètre de masse mesurant le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de l'échantillon. Le $\delta^{15}\text{N}$ de chaque échantillon a ensuite été calculé en utilisant l'équation 1 (Unkovich et al., 2008):

$$\text{Equation 1: } \delta^{15}\text{N}_{\text{échantillon}} (\text{\%}) = ((\% \ ^{15}\text{N}_{\text{échantillon}} - \% \ ^{15}\text{N}_{\text{atmosphère}}) / \% \ ^{15}\text{N}_{\text{atmosphère}}) \times 1000$$

IV.2. Analyse chimique du sol et des plantes

L'analyse des échantillons de sol prélevés a consisté en des mesures du pH eau, des teneurs en carbone et en azote total, et du phosphore assimilable. Le pH eau des sols a été mesuré par un pH mètre ORION model 720 dans un rapport sol/eau de 1/2,5 (Afnor 1981). Le carbone et l'azote total ont été déterminés par un analyseur CNS (Flash EA, 1112 séries) (Giroux et Audesse 2004). Le phosphore assimilable des sols a été mesuré par la méthode des résines (Kouno et al., 1995). Dans la méthode des résines des lamelles de résines sont préalablement agitées dans une solution de NaHCO_3 0,5M et introduites dans les solutions d'échantillons composées de 30 ml d'eau distillée et de 3 mg de sol sec. Le tout est agité sur un agitateur va-et-vient pendant 16 heures. Le P fixé sur les résines est alors extrait en agitant les résines préalablement débarrassées des particules de sols par lavage à l'eau distillée, dans une solution de HCl/NaCl 0,1 M. Le P contenu dans les extraits est ensuite dosé par colorimétrie au spectrophotomètre par la méthode au vert de malachite (Ohno et Zibilske, 1991).

L'azote total des échantillons de graines et de fanes de niébé prélevés à la récolte a été déterminé par un analyseur CNS (Flash EA 112 séries) (Giroux et Audesse 2004).

V. Calcul des proportions d'azote provenant de l'atmosphère (Ndfa)

Le calcul de la proportion d'azote provenant de l'atmosphère (Ndfa en pourcentage) dans les échantillons de niébé a été effectué en utilisant l'équation 2. Le Ndfa d'un champ était calculé en faisant la moyenne des 4 Ndfa obtenus par les 4 couples d'échantillons de niébé- plante de référence.

$$\text{Equation 2: \% Ndfa} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{légumineuse}}) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - B) \times 100$$

Le choix de la valeur B

Nous avons choisi la valeur B du niébé à partir de trois valeurs observées dans la littérature portant sur la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique du niébé en Afrique (-1,51 ; -1,759 ; -2,2). La première valeur (-1,51) donnait des résultats aberrants car elle était inférieure au $\delta^{15}\text{N}$ mesuré dans certains échantillons de niébé collectés, ce qui donnait des Ndfa supérieurs à 100%. La valeur B= -2,2 a été utilisée en Zambie (Nyemba et Bakora, 2010). La valeur B= -1,759 utilisée Naab et *al.* (2009), Belane et *al.* (2009), Belane et Dakora (2010) dans des études en milieu contrôlé et en milieu paysan au Nord du Ghana, a été jugée comme étant celle qui se rapproche le plus de la zone d'étude a été retenue pour les calculs de Ndfa.

VI. Calcul de la quantité d'azote fixé et du Bilan partiel de l'azote

Les quantités d'azote fixé dans les plantes ont été calculées en rapportant les proportions d'azote provenant de l'atmosphère à l'azote total des plantes.

Le bilan partiel de l'azote dans les parcelles a été calculé sur la seule année de culture du niébé assumant que l'azote contenu dans les racines et les exsudats racinaires du niébé à la récolte représente 50% de l'azote total de la plante (Laberge et *al.*, 2011) ; et que la proportion d'azote fixé dans les racines est similaire à celle fixée dans la partie aérienne. Les inputs considérés étaient ainsi les apports d'azote sous forme d'engrais et les quantités d'azote atmosphérique fixé. Les outputs étaient constitués des exportations d'azote à travers les graines et les fanes de niébé.

VII. Analyses et test statistique effectués

Des analyses de variance (ANOVA) ont été effectuées avec le logiciel XLSTAT et les moyennes ont été comparées avec le test de Fisher au seuil de 5% ($p=0,05$). Les données de fixation symbiotique (en pourcentage) et de rendement (en kg.ha^{-1}) qui ne suivaient pas une distribution normale ont subi une transformation arc-sinus, et logarithme népérien (\ln) respectivement, avant les ANOVA. Des box-plots ont été utilisés pour la représentation des résultats du milieu paysan (confère la description du box-plot en annexe 1) à l'aide du logiciel SIGMAPLOT. Des coefficients de corrélations de Pearson également ont été calculés.

Afin d'identifier des facteurs susceptibles d'influencer les proportions (Ndfa) et les quantités d'azote fixé chez le niébé, des analyses canoniques de redondance (Redundancy Analysis RDA) ont été effectuées à l'aide du logiciel CANOCO. Les proportions et quantités de N fixées par le Niébé ont été considérées comme variables expliquées. Les modes de gestion de la fertilité des sols et les propriétés chimiques des sols ont été considérées comme variables explicatives. Les variables qualitatives relatives au type de travail du sol et type de précédent cultural, ont été codées 0 (pour leur absence) et 1 (pour leur présence dans les champs). Le type de variété cultivé a été codé, 1 pour variété locale et 2 pour variété améliorée. Les variables quantitatives discrètes ou continues n'ont pas été transformées.

Chapitre III: Résultats et discussion

I. Propriétés chimique du sol, rendements, fixation et bilan partiels de l'azote.

I.1 Investigations sur le dispositif pérenne de Saria.

I.1.1. Effet des régimes de fertilisation sur les propriétés chimiques des sols (C, N total et P disponible)

Le carbone, l'azote total et le P disponible des sols mesurés en 2009 sur l'essai sont présentés dans le tableau 1. Le carbone total varie de 1,74 pour le témoin à 5,07 g.kg⁻¹ pour le FMO. L'azote total varie de 213 à 546 mg.kg⁻¹ et le P disponible de 1,72 à 32 mg.kg⁻¹. Le traitement témoin est celui qui a les plus faibles teneurs en C, N total et P tandis que les traitements fmo et FMO ont les teneurs les plus élevées. Le pH des sols des différents traitements varie de 6,5 pour le FMO à 5,2 pour le fm.

Tableau 1: Carbone et azote total, phosphore disponible et pH des sols sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009.

Traitements	C (g.kg ⁻¹)	N (mg.kg ⁻¹)	P (mg.kg ⁻¹)	pH
Témoin	1,74 (0,25) d	213 (28,3) c	1,72 (0,5) d	5,9 (0,1) b
fmo	2,94 (0,57) b	328 (54,2) b	16,1 (4,0) b	5,7 (0,1) b
fm	1,98 (0,31) cd	238,1 (32) c	12 (2,7) bc	5,2 (0,3) c
FMO	5,07 (0,77) a	546 (74,1) a	32 (5,9) a	6,5 (0,1) a
FM	2,36 (0,44) bc	266 (57,9) c	9,75 (4,2) c	5,3 (0,4) c
LSD	0,61*	62,4*	8,03***	0,5**

Test de Ficher effectué au seuil de significativité de 5% ($p \leq 0,05$). * : $p \leq 0,05$; ** : $p \leq 0,01$; *** : $p \leq 0,001$. Les chiffres entre parenthèses sont les déviations standards. Dans la même colonne, les moyennes indexées de lettres différentes sont statistiquement différentes ($n=6$).

I.1.2. Effet des régimes de fertilisation sur les rendements et teneurs en azote du niébé

Les rendements grains et fanes ainsi que les teneurs en azote des grains et des fanes du niébé sont présentés dans le tableau 2. Le plus faible rendement grains et fanes a été observé dans le

traitement témoin avec respectivement 0,48 et 1,33 t.ha⁻¹. Le traitement FMO a obtenu aussi bien les rendements grains et fanes les plus élevés que les teneurs les plus élevées en azote dans les graines et dans les fanes, avec respectivement 42,3 et 26,3 g.kg⁻¹ pour les teneurs en N.

Tableau 2: Rendements (matière sèche) et teneurs en azote des grains et fanes du niébé sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009.

Traitements	Graines (t.ha ⁻¹)	fanes (t.ha ⁻¹)	N graines (g.kg ⁻¹)	N fanes (g.kg ⁻¹)
Témoin	0,48 (0,11) a	1,33 (0,35) a	38,6 (2,1) ab	21,6 (3,12) a
fmo	0,83 (0,09) bc	2,58 (1,04) ab	37 (4,4) a	20,2 (2,95) a
fm	0,78 (0,10) b	2,37 (0,16) ab	39 (2,4) ab	19,4 (0,53) a
FMO	1,01 (0,22) c	3,54 (1,12) b	42,3 (3,5) b	26,3 (2,43) b
FM	0,68 (0,06) ab	2,84 (0,40) b	39 (0,3) ab	19,23 (0,63) a
LSD_{0,05}	0,22 *	1,5*	5,3*	4,7*

Test de Ficher effectué au seuil de significativité de 5% ($p \leq 0,05$). * : $p \leq 0,05$; ** : $p \leq 0,01$; *** : $p \leq 0,001$. Les chiffres entre parenthèses sont les déviations standards. Dans la même colonne, les moyennes indexées de lettres différentes sont statistiquement différentes (n=6).

I.1.3. Effet des régimes de fertilisation sur la composition isotopique de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) du niébé et des plantes de référence

Le $\delta^{15}\text{N}$ moyen des échantillons de sorgho, des mauvaises herbes et du niébé dans l'essai sont présentés dans le tableau 3. Le $\delta^{15}\text{N}$ des adventices diffère en fonction des traitements et varie de 6,1 pour le control et le FM à 8,3 pour FMO. Celui du sorgho varie dans le même ordre et va de 5,5 pour le control à 8,3 pour le FMO. Le test de comparaison d'échantillons de Kolmogrov-Smirnov, et le test bilatéral de Student n'ont pas montré de différence significative entre le $\delta^{15}\text{N}$ des adventices et du sorgho dans l'essai ($p=0,074$ et $p=0,083$ respectivement). Un $\delta^{15}\text{N}$ moyen a donc été calculé pour les couples mauvaises herbes et sorgho correspondant dans l'essai et a servi de $\delta^{15}\text{N}$ de référence pour les calculs futurs. Le $\delta^{15}\text{N}$ de référence varie ainsi de 8,28 pour le FMO à 6,03 pour le control. Celui du niébé moins élevé, varie également dans le même ordre que ceux des plantes de référence et va de 2,12 pour le control à 5,83 pour le FOM. La différence entre le $\delta^{15}\text{N}$ des plantes de référence et du niébé varie de 2,45 pour le FMO à 3,92 pour le témoin, sans toutefois être significativement différent entre les traitements.

Tableau 3: $\delta^{15}\text{N}$ moyen (%) des plantes de référence (adventices et sorgho) et du niébé sous différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009.

Traitement	$\delta^{15}\text{N}$ mauvaises herbes	$\delta^{15}\text{N}$ sorgho	$\delta^{15}\text{N}$ référence	$\delta^{15}\text{N}$ niébé	différence $\delta^{15}\text{N}$
Témoin	6,1 (1,3) b	5,52 (0,69) b	6,03 (0,5) b	2,12 (1,44) c	3,92 (1,77)
fmo	7,8 (1,2) a	6,41 (2,22) ab	7,75 (1,2) a	4,41 (1,13) ab	3,34 (0,46)
fm	7,0 (1,5) ab	6,06 (2,41) b	7,01 (1,9) ab	3,39 (1,6) bc	3,62 (2,22)
FMO	8,3 (0,3) a	8,31 (1,10) a	8,28 (0,6) a	5,83 (1,24) a	2,45 (1,28)
FM	6,1 (1,1) b	5,93 (0,79) b	6,21 (1,1) b	3,59 (0,85) bc	2,63 (0,96)
LSD	1,7*	2,25*	1,53*	2,25**	ns

Test de Ficher effectué au seuil de significativité de 5% ($p \leq 0,05$). * : $p \leq 0,05$; ** : $p \leq 0,01$. Les chiffres entre parenthèses sont les déviations standards. Dans la même colonne, les moyennes indexées de lettres différentes sont statistiquement différentes ($n=6$).

I.1.4. Effet des régimes de fertilisation sur la proportion d'azote du niébé provenant de l'atmosphère (Ndfa)

La figure 5 montre les proportions moyennes d'azote fixé par le niébé dans les différents traitements de l'essai de Saria. Le Ndfa le plus élevé a été observé dans le traitement témoin sur lequel le niébé a prélevé en moyenne 49% de ses besoins en azote de l'atmosphère. Celui du traitement FMO est de 24% et significativement inférieur au Ndfa du traitement témoin ($p = 0,013$). Sur les traitements fmo, fm et FM le niébé a prélevé en moyenne 31, 39 et 33%, respectivement, de ses besoins en azote de l'atmosphère.

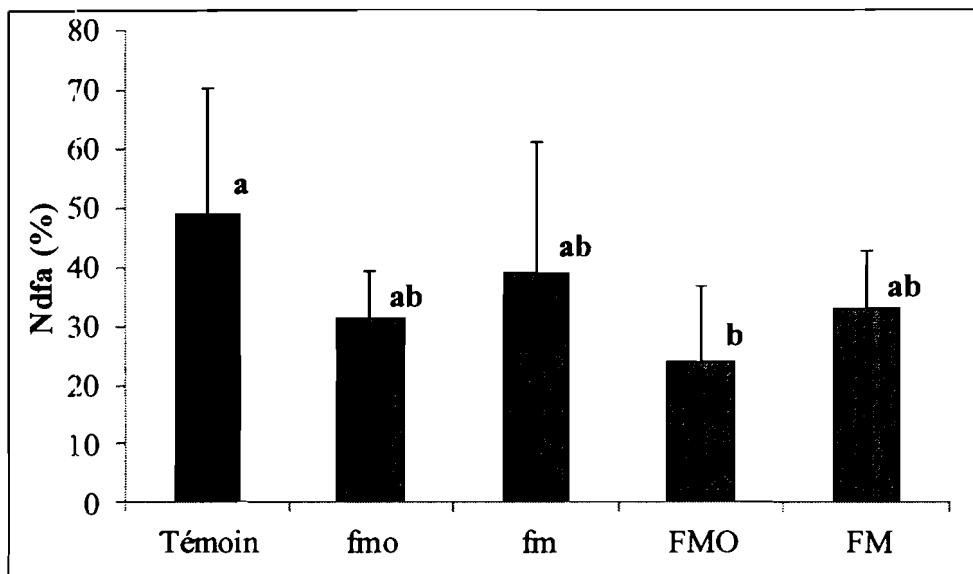


Figure 5: Pourcentage moyen d'azote du niébé provenant de l'atmosphère (Ndfa) sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009. Les bars d'erreur sont des déviations standards. Les histogrammes indexés de lettres différentes sont significativement différents ($n=6$).

I.1.5. Effet des différents régimes de fertilisation sur la quantité d'azote atmosphérique fixé par le niébé

Le tableau 4 présente les quantités d'azote atmosphérique fixé par le niébé dans les différents traitements de l'essai de Saria. Les quantités de N fixé dans les grains varient de $9,1 \text{ kg N ha}^{-1}$ dans le traitement témoin à $10,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ dans le traitement FMO. Les quantités de N fixé dans les fanes de niébé varient de $8,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ dans le témoin à $25,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ dans le FMO. Les quantités totales de N fixé vont de 17,6 dans le témoin à 34,7 dans le FMO et sont significativement différentes.

Tableau 4: Quantités d'azote atmosphérique fixé (en kg.ha⁻¹) dans la biomasse aérienne du niébé sous l'influence de différents régimes de fertilisation dans le dispositif pérenne de Saria en 2009.

Traitement	Grains (kg.ha ⁻¹)	Fanes (kg.ha ⁻¹)	Total (kg.ha ⁻¹)
Témoin	9,1 (4,1)	8,4 (7,5) b	17,6 (10,1) b
fmo	8,9 (3,9)	15 (11,9) ab	23,9 (14,3) ab
fm	10,2 (6,1)	12,3 (5,8) b	22,5 (11,4) ab
FMO	9 (6,1)	25,7 (17,3) a	34,7 (21,5) a
FM	9,3 (3,8)	14,5 (7,8) ab	23,8 (7,1) ab
LSD	ns	13,4*	17,1*

Test de Ficher effectué au seuil de significativité de 5% ($p \leq 0,05$). * : $p \leq 0,05$. Les chiffres entre parenthèses sont les déviations standards. Dans la même colonne, les moyennes indexées de lettres différentes sont statistiquement différentes. (n=6)

I.1.6. Bilan partiel de l'azote

Le bilan partiel de l'azote a été calculé sur la seule année de culture du niébé considérant que l'azote contenu dans les racines et les exsudats racinaires du niébé à la récolte représente 50% de l'azote total de la plante (Laberge et al., 2011), et que la proportion d'azote fixé dans les racines est similaire à celle fixée dans la partie aérienne. Vu qu'il n'y a pas d'apport de fumier dans les traitements organiques en année de niébé dans l'essai, nous avons considéré comme inputs les quantités d'azote minéral apporté ainsi que les quantités d'azote fixé dans les différents traitements. Les quantités d'azote exporté par les graines et les fanes de niébé ont été considérées comme étant les outputs. Le bilan partiel de l'azote calculé dans l'essai est représenté dans le tableau 5. Les quantités totales d'azote fixé (dans la partie aérienne et les racines) varient ainsi de 35 kg N ha⁻¹ dans le témoin à 69 kg N ha⁻¹ dans le FMO. L'azote exporté par les grains et les fanes de niébé varie de 36 kg N ha⁻¹ dans le témoin à 150 kg N ha⁻¹ dans le FMO. Le bilan partiel de l'azote qui varie de -24 kg N ha⁻¹ dans le FMO à 29 kg N ha⁻¹ dans le FM. Le traitement témoin de l'essai a un bilan légèrement négatif (-0,9 kg N ha⁻¹) tandis que les traitements fmo et fm ont des bilans partiels positifs avec 9,5 et 13,6 kg N ha⁻¹ respectivement.

Tableau 5: Bilan partiel de l'azote dans le dispositif pérenne de gestion de la fertilité des sols de Saria (Centre-Ouest du Burkina Faso) sous culture de niébé en 2009.

Traitements	N minéral apporté (kg.ha ⁻¹)	Azote totale fixé (kg.ha ⁻¹)	Azote totale exporté (kg.ha ⁻¹)	Bilan azote partiel (kg.ha ⁻¹)
témoin	0	35,1 (20,1) b	36 (13,6) c	-0,91 (14,3) ab
fmo	33	47,8 (28,6) ab	71,3 (31,8) b	9,52 (4,7) ab
fm	33	45,1 (22,7) ab	64,8 (20,4) bc	13,6 (30,7) a
FMO	56	69,3 (43,1) a	150 (37,1) a	-24,4 (52,1) b
FM	56	47,6 (14,1) ab	74,6 (19,6) b	29 (16,6) a
LSD	-	34,2*	35,3*	37,7*

Test de Ficher effectué au seuil de significativité de 5% ($p \leq 0,05$). * : $p \leq 0,05$. Les chiffres entre parenthèses sont les déviations standards. Dans la même colonne, les moyennes indexées de lettres différentes sont statistiquement différentes (n=6)

I.2. Investigations en milieu paysan

I.2.1. Diversité des pratiques paysannes

I.2.1.1. Variétés cultivées

Six variétés de niébé, dont quatre variétés améliorées ont été identifiées dans les champs paysans. Le tableau 6 présente ces différentes variétés. La variété la plus fréquente est la variété moussa local, cultivée dans 10 champs. Cependant on remarque que des variétés améliorées ont été cultivées dans au total 19 champs, représentant plus de la moitié des champs.

Tableau 6: Types et nombres de variétés de niébé rencontrées dans les 33 champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso en 2010.

Type de variété	Nom de la variété	Nombre de champs
Variétés améliorées	KV X 61-1	9
	KV X 745-11P	3
	KVX 396-4-5-2D	3
	KVX 396-4-4	4
Variétés locales	Moussa local (appellation locale)	10
	Bazoulakoi (appellation locale)	4

I.2.1.2. Précédant cultural, travail du sol, Sarclage et traitements pesticides

Différents types de travail du sol et de précédents culturaux ont été observés par les paysans (Tableau 7). Le grattage et le billonnage ont chacun été faits dans 33% des champs. Le labour a été pratiqué dans 30%, et le semis direct sans travail du sol a été effectué dans 3% des champs. Le niébé cultivé dans les champs paysans en 2010 a succédé des céréales (sorgho ou mil) dans 45% des champs. Le précédent cultural était une culture de légumineuse (arachide, voandzou ou le niébé) dans 42% des champs, tandis que 12% des champs n'ont pas été cultivés l'année précédent la culture du niébé (en 2010).

La figure 6 montre que la plupart des champs ont subi les opérations de sarclage et de traitement insecticides. Le nombre de sarclage effectué dans les champs a varié de 1 à 3. La majorité (70%) des champs ont subi 2 sarclages. Le nombre de traitements pesticides effectué a varié de 0 à 5. Le nombre de traitement pesticide varie de 0 à 5. On note que 1 ou 2 traitements insecticides ont été appliqués dans respectivement 30% des champs.

Tableau 7: Modes de travail du sol et précédents culturaux observés dans les champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de niébé en 2010 (nombre de champs = 33).

Pourcentage de champs		
Type de travail de sol	semi direct	3%
	grattage	33%
	billonnage	33%
	labour	30%
Précédant cultural	céréale	45%
	légumineuses	42%
	aucune culture	12%

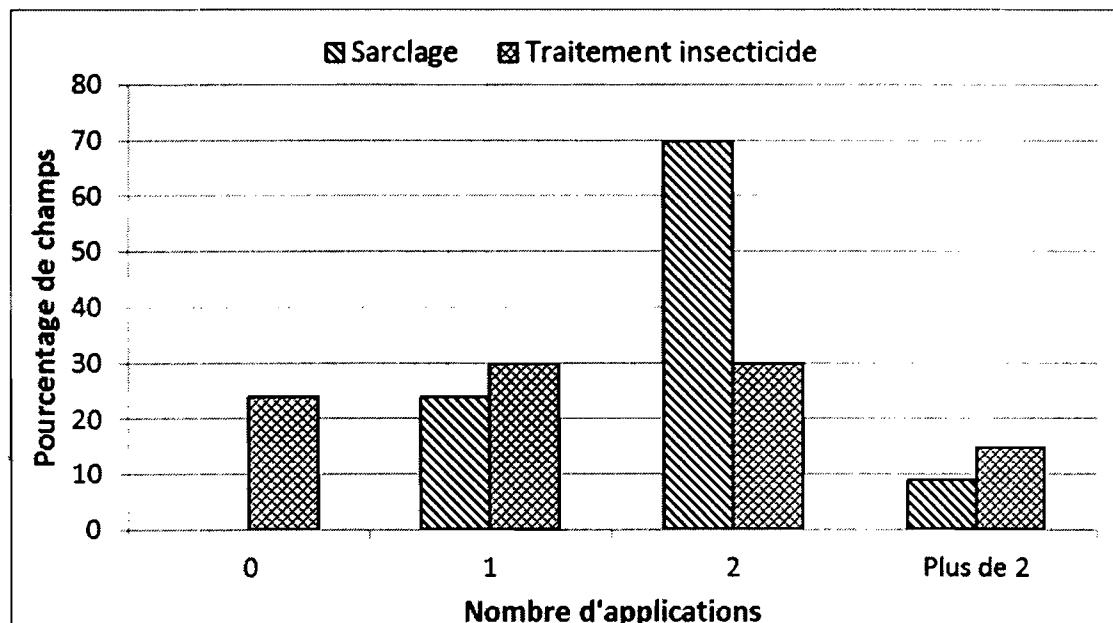


Figure 6: Nombre de sarclages et de traitements insecticides effectués dans les champs paysans du centre ouest du Burkina Faso sous culture de niébé en 2010 (nombre de champs = 33).

I.2.1.3. Fertilisation des champs

Fertilisation organique

La fertilisation organique est très peu pratiquée dans les champs de niébé. En 2010, Seulement 4 des 33 champs (12%) ont bénéficié d'apports de matière organique. Deux sous forme de fumier, un sous forme de déchets ménagers et le dernier sous forme de feuilles de neems (*Azadirachta indica*) associé à de l'engrais minéral NPK

En tenant compte de la moyenne des apports de matière organique des cinq dernières années (tableau 8), la dose moyenne de matière organique appliquée annuellement dans les champs de 2005 à 2010 varie de 0 à 7,55 t.ha⁻¹ de matière organique ; 67% des champs étudiés n'ont bénéficié d'aucun apport de matière organique depuis 2005.

Tableau 8: Proportions de champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso selon la quantité moyenne de matière organique appliquée de 2005 à 2010 (nombre de champs = 33).

Quantité moyenne de MO de 2005 à 2010 en t.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Pourcentage de champs
0,00	67%
] 0,00 – 2,50]	27%
] 2,50 – 7,55]	6%

La stratégie de fertilisation généralement pratiquée par les paysans sur le niébé est donc une fertilisation minérale, principalement constituée d'engrais NPK.

Fertilisation minérale

La fertilisation minérale a été la plus fréquemment rencontrée dans les champs de niébé. En 2010, seulement 7 champs soit 21% du nombre total de champs étudiés n'ont pas reçu le complexe NPK. L'utilisation de l'urée est très limitée, et a été appliquée dans seulement 5 champs. L'engrais NPK est fréquemment appliqué dans les champs de niébé (tableau 9). Il existe cependant une grande variabilité dans les quantités utilisées dans les champs. Les doses appliquées vont ainsi de 0 à 128 kg.ha⁻¹. Environ 24% des champs n'ont pas reçu d'engrais numéral et 42% l'on reçut à une dose inférieure à 50 kg.ha⁻¹, qui est celle recommandée pour les légumineuses dans la région.

Tableau 9: Proportions de champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso selon la quantité d'engrais minéral NPK appliqués sous culture de niébé en 2010 (nombre de champs = 33).

Quantités de NPK apporté (kg.ha ⁻¹)	Pourcentage de champs
0	24%
0-50	42%
50-100	27%
>100	6%

La figure 7 présente les quantités d'éléments fertilisants apportés dans les champs. Les quantités de N, P et K apportés dans les champs ont varié respectivement entre 0 et 64, 0 et 13 et entre 0 et 13 kg.ha⁻¹. On note que 75% des champs étudiés ont reçu des apports inférieurs à 9,5; 6,5 et 7 kg.ha⁻¹ respectivement pour le N, le P et le K. La moyenne de l'apport pour l'ensemble des champs ayant reçu de l'azote sous forme d'engrais est de 9,57 kg.ha⁻¹ de N. Les variétés améliorées ont reçu plus d'engrais que les variétés locales. 75% des champs de variétés locales ont reçu moins de 8 kg.ha⁻¹ de N tandis que 50% des champs de variétés améliorées ont reçu plus de 8 kg.ha⁻¹ N. Les mêmes tendances ont été observées pour le phosphore et le potassium.

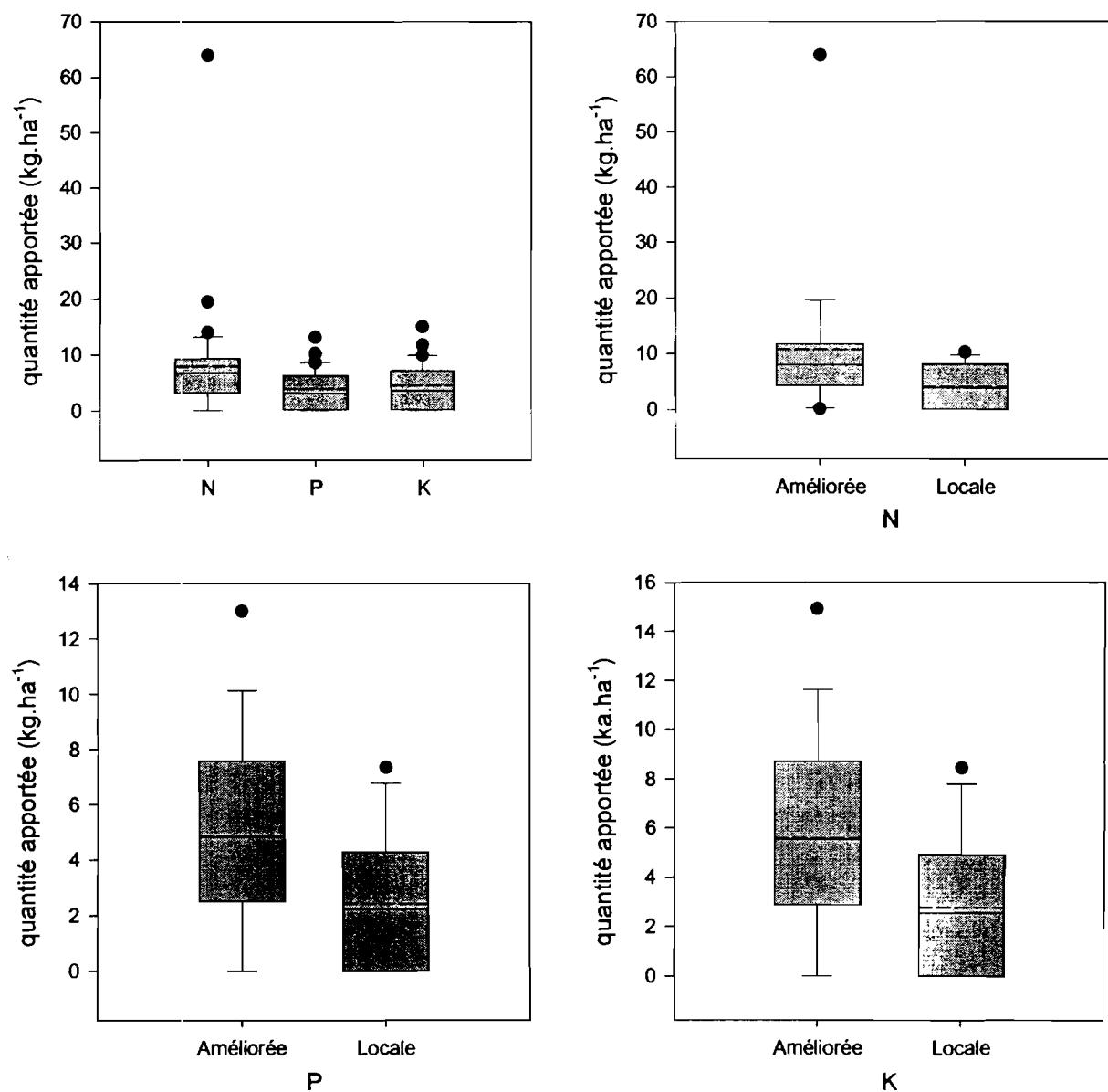


Figure 7: Quantités de N, de P et de K apportés par les engrains minéraux dans les champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de niébé. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne.

I.2.2. Etat de fertilité des champs

La figure 8 présente les niveaux de carbone, azote et de P disponible des champs paysans. Dans l'ensemble, le carbone varie de 1,9 à 7,34 g.kg⁻¹, et est inférieur à 4,5 g.kg⁻¹ dans 75% des champs. L'azote total varie de 0,013 à 0,37 mg.kg⁻¹ et est inférieur à 0,16 g.kg⁻¹ dans 75% des champs. Le P disponible des champs varie de 0,39 à 31,5 mg.kg⁻¹ et 75% des champs ont un P disponible inférieur à 2 mg.kg⁻¹. Dans l'ensemble, le pH des champs varie de 5,5 à 6,9. Le pH moyen pour l'ensemble des champs est de 6,1. Les teneurs en C, N total et P disponible, ainsi que le pH des champs ne diffèrent pas significativement selon qu'on y a cultivé des variétés locales ou améliorées.

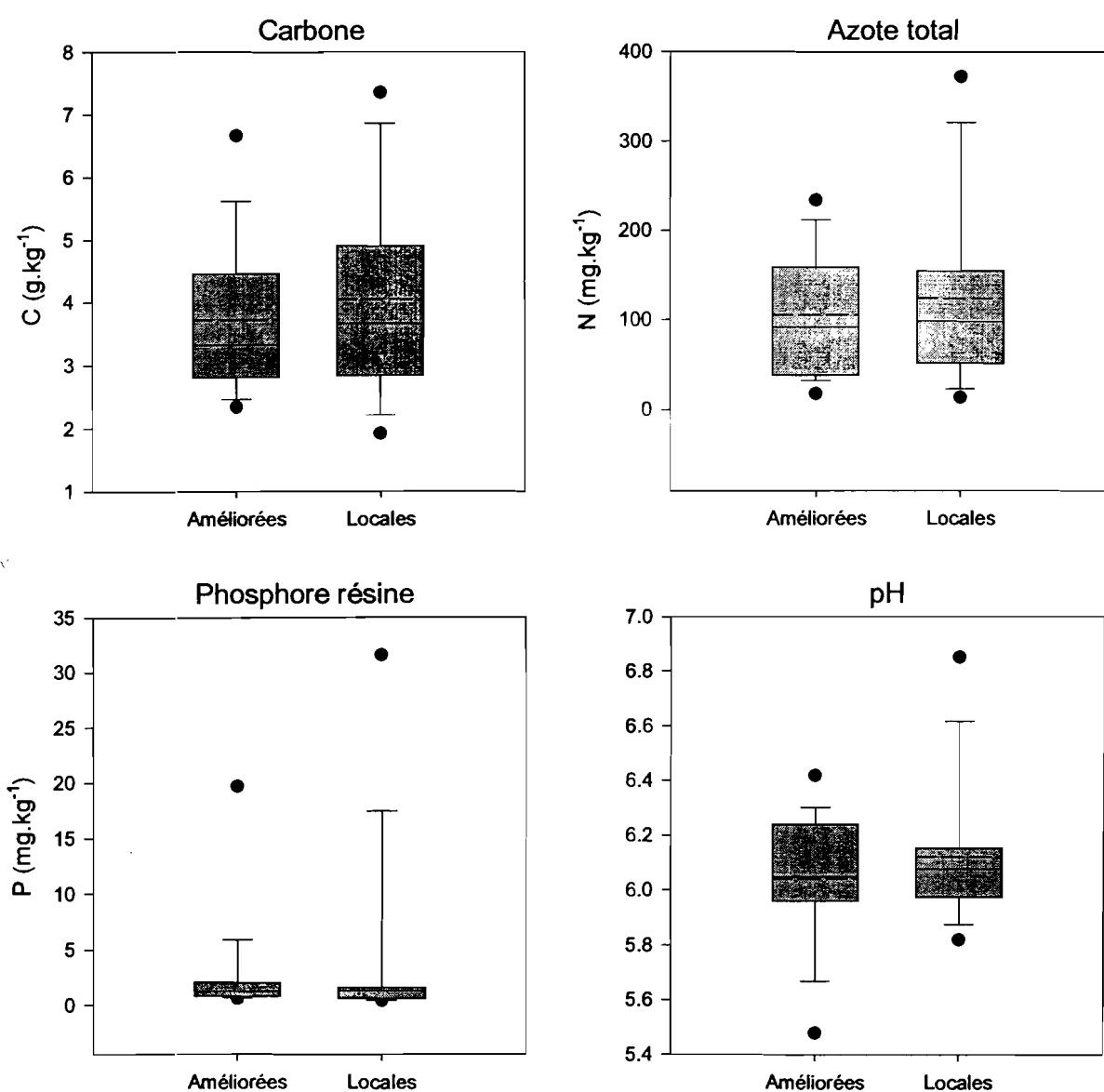


Figure 8 Teneurs en carbone, azote total et P disponible (résine) des sols de champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de variétés améliorées et locales de niébé. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne.

I.2.3. Rendements et teneurs en azote du niébé

Dans l'ensemble, les rendements obtenus dans les champs (figure 9) varient de 0,03 à 1,41 t.ha⁻¹ et de 0,12 à 10,5 t.ha⁻¹ respectivement pour les grains et les fanes de niébé. Nous n'avons pas observé de différences significatives entre les rendements de chacune des variétés prises individuellement. Cependant, les variétés améliorées prises ensemble ont des rendements significativement supérieurs aux variétés locales. Les rendements grains moyens sont de 0,33 : 0,41 et 0,23 t.ha⁻¹ respectivement pour l'ensemble des champs, les variétés améliorées et les variétés locales. Les variétés améliorées ont produit des rendements grains et fanes significativement supérieurs aux variétés locales ($p= 0.027$ et $p=0.016$ respectivement). Près de 50% des champs de variétés améliorées ont eu un rendement grain supérieur à 0,32 t.ha⁻¹ tandis que 75% des champs de variétés locales ont eu des rendements grains inférieurs à 0,3 t.ha⁻¹. La même tendance s'observe dans les rendements fanes.

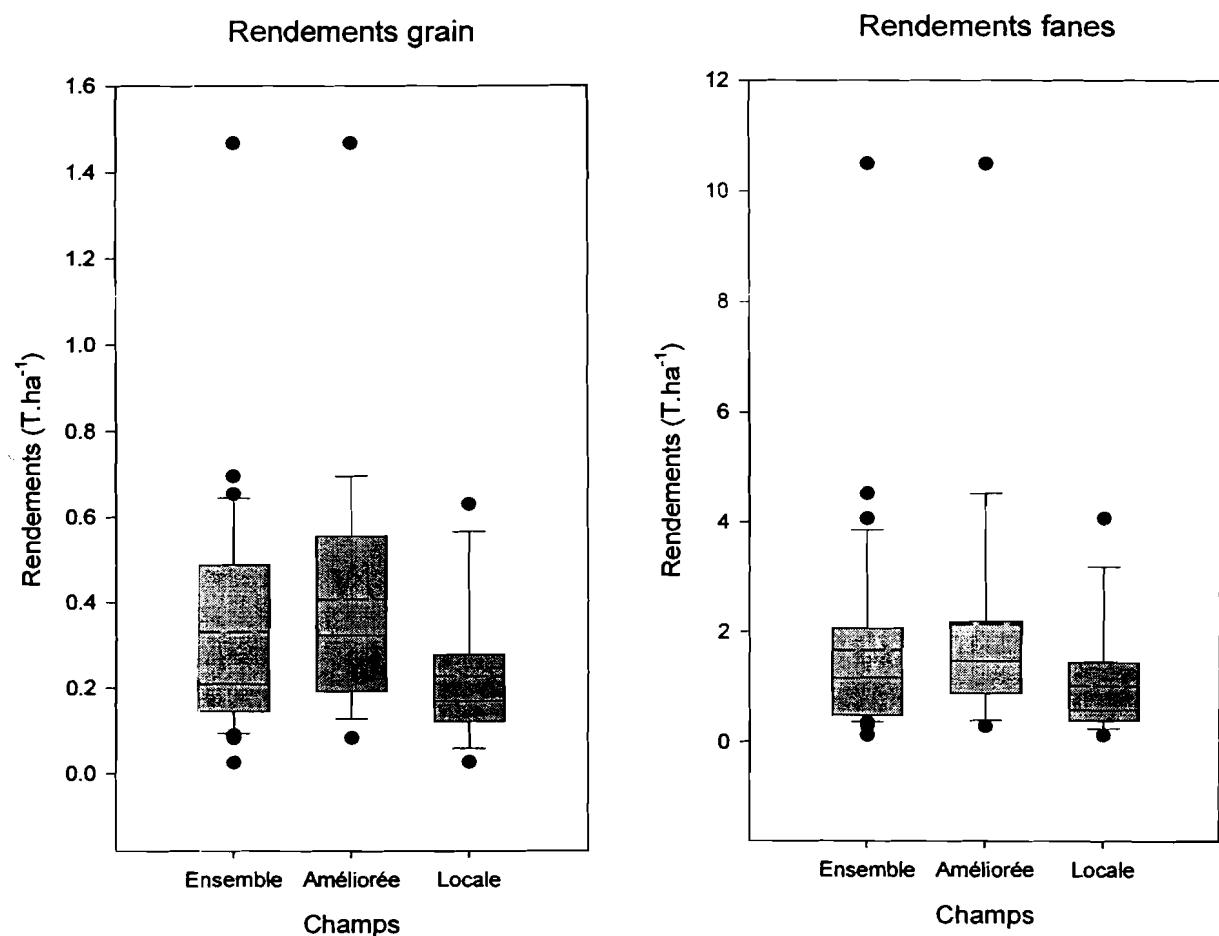


Figure 9: Rendements graine et fanes mesurés sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso sous culture de variétés améliorées et locales de niébé. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne.

Les teneurs en azote du niébé dans les champs paysans ont varié de 14,9 à 32,9 g.kg⁻¹ et de 34,7 à 54,3 g.kg⁻¹ avec une moyenne 23,5 et de 40,5 g.kg⁻¹ respectivement pour les fanes et

les grains (figure 10). Il n'y a pas de différence significative entre les variétés améliorées et locales sur les teneurs en azote des grains ou des fanes.

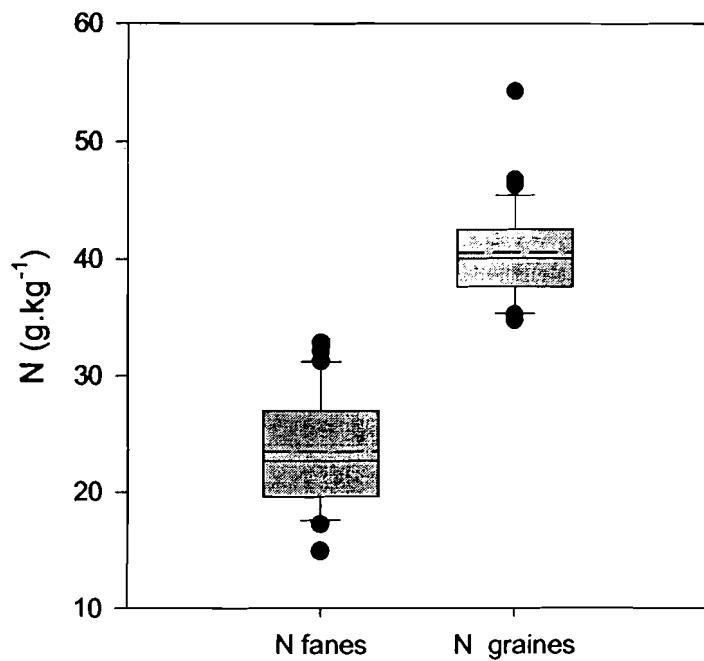


Figure 10: Teneurs en azote des grains et des fanes de niébé mesurées sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne

I.2.4. Composition isotopique de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) du niébé et des plantes de référence

La figure 11 présente la distribution du $\delta^{15}\text{N}$ du niébé et des plantes de références dans les champs paysans. Le $\delta^{15}\text{N}$ des plantes de référence a varié de 2,1 à 7,8‰ avec une moyenne de 4,1‰. Celui du niébé a varié de -1,5 à 4,2‰ avec une moyenne de 0,2‰. La différence minimale de $\delta^{15}\text{N}$ par couple plante de référence-niébé ($\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{niébé}}$), varie de 1,6 à 6,6‰ et est en moyenne de 3,9‰. On note que cette différence ($\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{niébé}}$) n'était pas significativement différente entre les variétés.

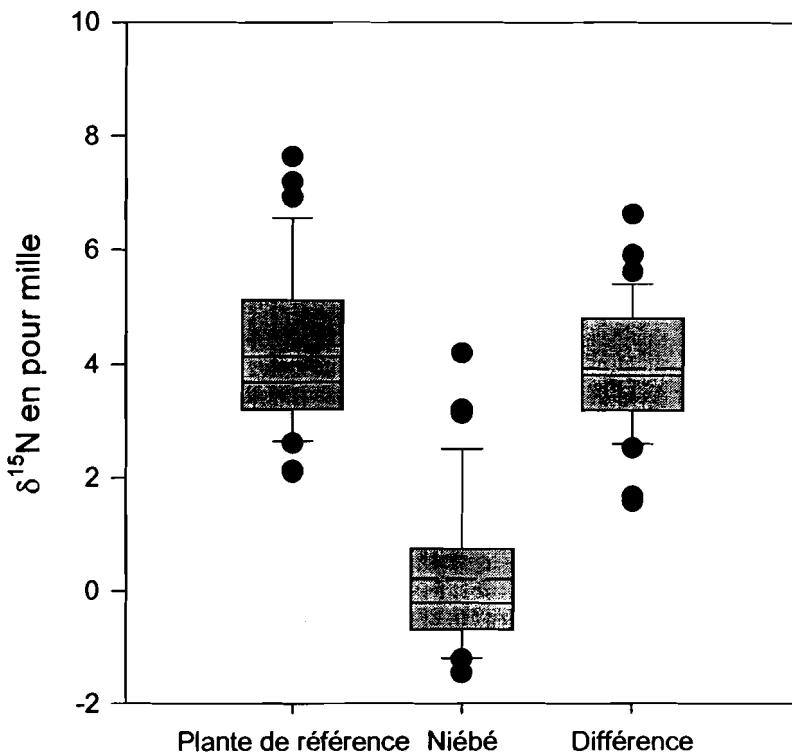


Figure 11: $\delta^{15}\text{N}$ des plantes de référence et de niébé mesurés sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne.

I.2.5. Proportion d'azote du niébé provenant de l'atmosphère (Ndfa)

La figure 12 présente le Ndfa du niébé dans les champs paysans. Dans l'ensemble, le niébé a fixé en moyenne 68,3% de son azote de l'atmosphère. Les proportions fixées sont différentes entre les variétés améliorées et locales comme présenté dans la figure 6. Le Ndfa a varié 22 à 89% dans les champs de variétés améliorées, et de 55 à 92% dans les champs de variétés locales. Le Ndfa moyen des champs de variétés améliorées est de 63%, et est significativement inférieur au Ndfa moyen des variétés locales qui est de 75,5% ($p=0,03$). On note également que la moitié des variétés améliorées a eu un Ndfa inférieur à 67% tandis que les 3/4 des variétés locales ont eu un Ndfa supérieur à 65%. Dans l'ensemble, les champs paysans ont eu des Ndfa supérieurs à ceux mesurés dans l'essai de Saria.

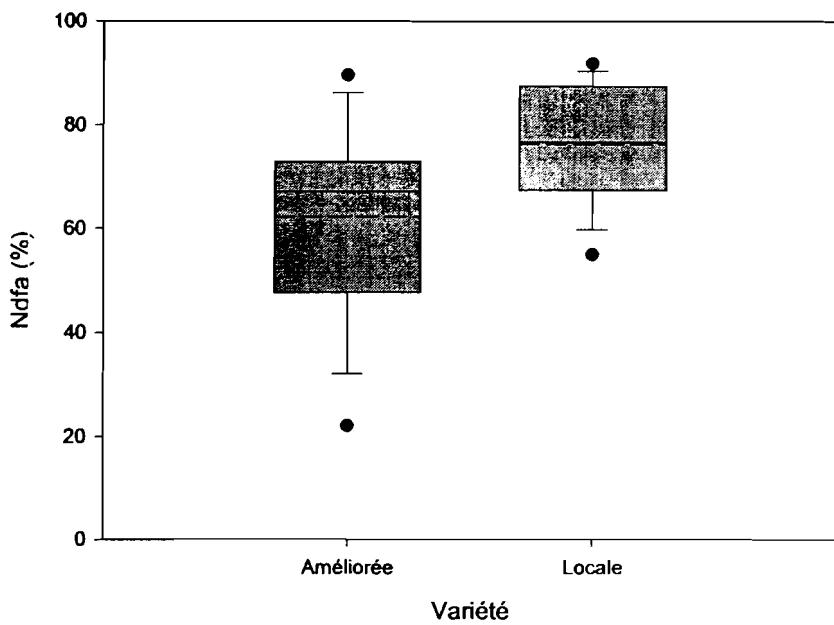


Figure 12: Proportions d'azote prélevé de l'atmosphère par les variétés améliorées et locales de niébé, mesurées sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne.

I.2.6. Quantités d'azote fixé dans les champs

Les quantités d'azote fixé par le niébé dans les champs paysans sont présentées dans la figure 13. Les quantités fixées dans les champs de variétés améliorées ont varié de 8 à 188 kg N.ha⁻¹ avec une moyenne de 43 kg N.ha⁻¹. Les quantités fixées dans les champs de variétés locales varient de 3 à 60 kg N.ha⁻¹ avec une moyenne de 24 kg N.ha⁻¹. La quantité moyenne d'azote fixé pour l'ensemble des champs a été de 34,8 kg.ha⁻¹. La différence entre les deux groupes de variétés n'est pas significative. On note que 50% des champs de variétés améliorées et de variétés locales ont respectivement des quantités d'azote fixé inférieures à 27,6 et 17 kg N.ha⁻¹.

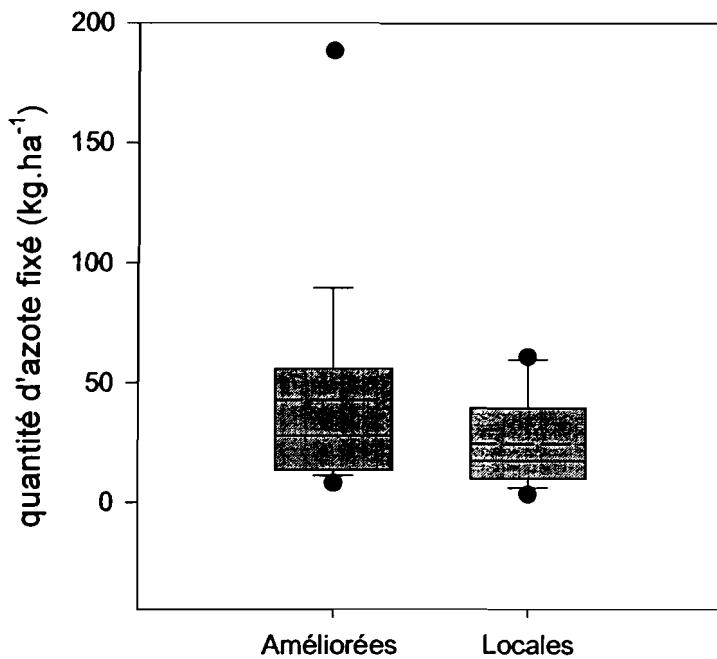


Figure 13: Quantités d'azote atmosphérique fixé par les variétés améliorées et locales de niébé, mesurés sur des champs paysans du Centre-Ouest du Burkina Faso. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne.

I.2.7. Bilan en azote partiel des champs

Pour le calcul du bilan partiel de l'azote dans les champs paysans, nous n'avons pas tenu compte des apports d'azote à travers les amendements organiques dans les champs à cause de leur rareté et de leur diversité qui ne permettent pas de faire une estimation satisfaisante. La figure 14 présente de bilan partiel de l'azote dans les champs de variétés améliorées et de variétés locales de niébé. Le bilan est positif dans la grande majorité des champs et va de -28 à 142 kg N ha⁻¹ avec une moyenne de 31 kg N ha⁻¹ pour les variétés améliorées., et de 1,8 à 52,5 kg N ha⁻¹ avec une moyenne de 20,6 kg N ha⁻¹ pour les variétés locales. On note que 50% des champs ont un bilan azoté supérieur à 30 et à 14 kg N ha⁻¹, respectivement pour les variétés améliorées et les variétés locales. Il n'y a cependant pas de différence significative entre le bilan partiel sous variétés améliorées et celui sous variétés locales.

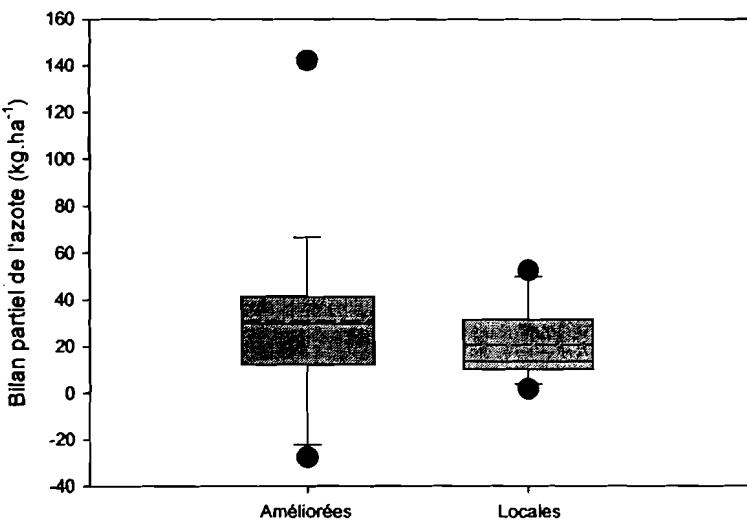


Figure 14: Bilan partiel de l'azote calculé sur des champs de variétés améliorées et locales de niébé, dans le Centre-Ouest du Burkina Faso. A l'intérieur des box, la ligne continue représente la médiane et la ligne discontinue indique la moyenne

I.3. Discussion

I.3.1. Modes de gestion des champs, caractéristiques chimiques des sols et rendements du niébé

La production du niébé en milieu paysan présente une très grande diversité relative aux variétés cultivées, aux pratiques culturales, aux modes de gestion des parcelles et à la fertilisation des champs. Plus de la moitié des champs de niébé étudiés sont des variétés améliorées. Cette proportion d'adoption des variétés améliorées est de loin plus élevée que le niveau d'ensemble d'adoption des variétés améliorées par les paysans au Burkina Faso. A titre de comparaison, le niveau d'adoption des variétés améliorées de niébé pour l'ensemble du Burkina Faso serait d'environ 10% (Kaboré et al. 2010). Cela est probablement lié à la proximité de la station de recherche de l'INERA, et au développement du marché des semences améliorées. En effet, la collaboration entre les organisations paysannes et la station de recherche a permis l'émergence de producteurs locaux de semences améliorées. Ce qui a probablement favorisé leur vulgarisation aux alentours de la station. La diversité des pratiques de gestion de la fertilité des sols et des pratiques culturales a déjà été observée par Kiba (2012) sur les champs de niébé dans 6 villages environnant la station de recherche de Saria. Cette diversité serait à l'origine de la grande diversité des propriétés chimiques des

sols, des rendements, et par conséquent de la fixation d'azote mesuré dans ces champs paysans par rapport aux résultats de l'essai de Saria.

Les effets à long terme des différents modes de gestion de la fertilité sur les propriétés chimiques des sols et les rendements des cultures ont été abordés par de nombreux auteurs (Sedogo, 1993 ; Kambire, 1994 ; Hien, 2004; Lombo, 2002 ; Kiba, 2012). Les régimes de fertilisation impliquant la fumure organique permettent de maintenir et d'améliorer le potentiel productif et les caractéristiques chimiques du sol (carbone, azote total et phosphore disponible etc.), comparativement à l'absence totale de fertilisation ou à la fertilisation minérale seule. Les plantes seraient donc beaucoup moins limitées en nutriments, notamment en azote et en phosphore, dans les traitements incluant la fertilisation organique. Cela explique les rendements plus élevés dans ces derniers traitements par rapport aux autres traitements de l'essai de Saria.

En milieu paysan, les pratiques de fertilisation des champs se caractérisent par une très faible utilisation des fumures organiques, due à leur disponibilité limitée (Sedogo, 1993). Les apports de fumier dans les champs paysans sont généralement très inférieurs à ceux expérimentés dans l'essai de Saria. Par contre, même si les quantités apportées ne sont pas importantes, la fertilisation minérale est plus souvent pratiquée dans les champs de niébé en milieu paysan spécialement sur les variétés améliorées. Le caractère rentable du niébé incite les paysans à investir dans les intrants pour cette culture. Les quantités d'éléments N, P et K apportés par les engrains minéraux demeurent cependant faibles dans la majorité de ces champs. Ces résultats corroborent ceux de Kiba (2012) qui a trouvé des quantités similaires d'engrais minéraux apportés dans les champs de niébé dans les mêmes villages. Les faibles apports de fertilisants minéraux et surtout organiques, expliquent également les teneurs très faibles en carbone ($<10 \text{ g}.\text{kg}^{-1}$), en azote ($<1\text{g}.\text{kg}^{-1}$) et en phosphore disponible des sols. Ces faibles apports expliqueraient également en partie, les faibles rendements observés dans les champs paysans qui sont généralement proches du rendement observé sur le traitement témoin de l'essai de Saria. Toutefois, les rendements des variétés améliorées sont supérieurs à ceux des variétés locales. Les variétés améliorées ont des caractères de résistance aux maladies et aux insectes ainsi que des potentiels de rendements plus élevés. Cela les rend cependant plus exigeants en terme de fertilisation, d'où certainement les apports d'engrais minéraux plus importants dont ils ont bénéficié par rapport aux variétés locales. Des rendements similaires ont été observés par Kiba (2012). Belane et Dakora (2009) ont trouvé des rendements de niébé plus élevés sur des lixivisols du nord du Ghana, ayant cependant des

teneurs en C, N et P disponible, et des conditions de pluviométrie beaucoup plus favorables que celles de notre zone d'étude.

I.3.2. Composition isotopique de l'azote des plantes de référence et du niébé

Dans l'essai de Saria, les régimes de fertilisation incluant l'application régulière de fumier entraînent une augmentation significative du $\delta^{15}\text{N}$ des plantes de référence comparativement à la fertilisation exclusivement minérale et au témoin. Les plantes de référence sont non fixatrices d'azote atmosphérique, et leur $\delta^{15}\text{N}$ reflète celui de la source d'où elles tirent leur azote c'est-à-dire le sol amendé ou pas, et les fertilisants utilisés (fumier et/ou engrains minéraux). Le $\delta^{15}\text{N}$ élevé des plantes de référence issues des traitements fmo et FMO s'expliquerait donc par un enrichissement du sol en ^{15}N lié aux applications du fumier qui est connu pour avoir un $\delta^{15}\text{N}$ élevé (Bateman et Kelly, 2007). De même, les traitements recevant uniquement les engrains minéraux qui ont un $\delta^{15}\text{N}$ proche de zéro (Nakano et al., 2003) ont des $\delta^{15}\text{N}$ plus faibles. Des résultats similaires ont été trouvés sur des essais de longue durée par Gerzabek et al. (2001) et Oberson et al. (2007). Les valeurs généralement plus basses du $\delta^{15}\text{N}$ des plantes de référence dans les champs paysans comparativement à l'essai de Saria s'expliqueraient par les apports de fumier plus faibles et moins régulier dans les champs paysans. Cela entraîne une signature ^{15}N plus faible du sol dans les champs paysans qui se reflète sur celle des plantes de référence.

Le $\delta^{15}\text{N}$ du niébé dans l'essai et dans les champs paysans est nettement inférieur (de l'ordre de 2 à 5‰ dans l'ensemble) à celui de leurs plantes de référence correspondantes. Pour la majorité des champs, les différences de $\delta^{15}\text{N}$ entre niébé et plantes de référence sont au-delà de la différence minimale de $\delta^{15}\text{N}$ de 2‰ requise pour le calcul du Ndfa (Unkovich et al., 1994). Cela indique qu'en plus du sol, il existe une autre source de prélèvement d'azote chez le niébé qui est l'atmosphère (Spriggs et al., 2003). De plus, de nombreux auteurs (Högberg, 1997 ; Peoples et al., 2002 ; Unkovich et al., 2008) ont mis en évidence l'existence d'un phénomène interne de fractionnement isotopique de l'azote assimilé par les légumineuses pendant la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Ce phénomène entraînant l'appauvrissement en ^{15}N de la légumineuse, explique les $\delta^{15}\text{N}$ plus faibles et même parfois négatifs du niébé comparativement aux plantes de référence. Il est aussi à l'origine de la valeur B lorsque la légumineuse dépend exclusivement de l'azote atmosphérique. Selon Peoples et al., (2002), la valeur B bien est beaucoup moins dépendante de la variété de la légumineuse, que de la souche de *Rhizobiaceae* impliquée dans le fixation symbiotique. La

valeur B que nous avons choisie étant celle qui se rapproche le plus des conditions pédoclimatiques de notre site d'étude serait donc celle qui nous procure l'estimation la plus réaliste du Ndfa.

I.3.3. Proportions (Ndfa), quantité d'azote atmosphérique fixé et bilan partiel de l'azote

Dans l'essai de Saria, le Ndfa est relativement élevé dans le témoin qui a les teneurs les plus faibles en C, N total et P disponible du sol, par rapport aux autres traitements. Le Ndfa est aussi élevé en milieu paysan où les teneurs en P disponible sont plus proches de celle du traitement témoin de l'essai de Saria. Les conditions de croissance ne semblent donc pas limiter le Ndfa (Lüscher et al., 2011). Cependant, les teneurs d'azote élevées dans les traitements incluant le fumier, rendent les plantes moins dépendantes de la fixation symbiotique, et entraîneraient une baisse du Ndfa (Zahran, 1999) en rapport avec les besoins des plantes. Les teneurs en azote des plantes étant relativement similaires dans les différents traitements de l'essai de Saria, et dans les champs en milieu paysan, les quantités d'azote fixé par le niébé sont donc directement dépendantes du rendement des champs (Lüscher et al., 2011), qui eux sont surtout dépendants de la fertilité du sol, (teneurs en P et en N notamment). Belane et al. (2011) ont trouvé sur 32 variétés de niébé et sur un sol ayant des teneurs en phosphore nettement plus grandes, des rendements et des quantités plus élevées d'azote fixé que celles mesurées dans notre étude. Les faibles quantités d'azote fixé dans les champs de niébé seraient donc principalement dues aux faibles teneurs en éléments nutritifs des sols, notamment le P disponible, qui entraînent des rendements faibles.

La variabilité des Ndfa du niébé en milieu paysan a déjà été relevée dans plusieurs études. Adjei-Nsiah et al. (2008) ont trouvé des Ndfa du niébé variant entre 46 et 68% (49 à 86 kg N ha⁻¹) en fonction des variétés cultivées. Dans la même tendance que nos résultats, Naab et al. (2009) ont trouvé des Ndfa variant de 12 à 99 % et des quantités de N fixés allant de 1,3 à 42,6 kg N ha⁻¹ selon les champs paysans. Nous attribuons cette variabilité de fixation observée à la diversité des pratiques paysannes qui se traduisent par une variabilité des modes de gestion des champs, des variétés cultivées, et de la fertilité des sols. Le Ndfa du niébé est significativement plus élevé pour les variétés locales comparativement aux variétés améliorées. Les variétés améliorées cultivées dans les champs paysans ont été sélectionnées pour des caractères de résistances aux maladies et/ou aux insectes, et pas nécessairement pour leur aptitude à la fixation symbiotique de N. En outre, les apports d'azote sous forme d'engrais minéral, plus important sur les variétés améliorées pourraient expliquer le Ndfa

significativement plus faible pour ces variétés améliorées comparativement aux variétés locales. Nous avons relevé des corrélations négatives et significatives entre le Ndfa des champs, la quantité d'azote minéral apporté dans les champs, et les teneurs en azote total des sols (annexe 2). En revanche, les quantités d'azote fixé ne sont pas significativement différentes entre les variétés locales et améliorées. Cela s'explique par la grande variabilité des rendements, dont dépendent les quantités d'azote fixé (Lüscher et al., 2011). Les rendements élevés des variétés améliorées auraient donc équilibré les quantités de N fixé par rapport aux variétés locales qui ont eu des proportions d'azote fixé plus élevées.

Le bilan partiel de l'azote dans les champs de niébé en milieu paysan est généralement positif malgré l'exportation des résidus de culture. Cela pourrait s'expliquer par la faiblesse des exportations d'azote liées aux faibles rendements graines et fanes, et aussi par les Ndfa relativement élevés des champs. Ce bilan dépend aussi largement de la proportion importante d'azote contenu dans les racines et les exsudats racinaires du niébé (Laberge et al., 2011).

Le bilan partiel de N est généralement plus faible dans l'essai de Saria où les différents Ndfa sont inférieurs à ceux relevés dans les champs paysans, alors que les exportations à travers les rendements sont plus élevées. Le bilan négatif traitement FMO de l'essai de Saria s'explique par sa forte teneur en azote du sol, du fait qu'il a bénéficié de l'azote résiduel issu de la grande quantité de fumier (40 t.ha^{-1}) apporté l'année précédente, lors de la culture du sorgho. Cela aurait entraîné la grande production de biomasse et un prélèvement plus important de l'azote du sol. Nous avons relevé une corrélation négative et significative entre le bilan partiel de l'azote dans les champs et les teneurs en azote total des sols (annexe 2). Un bilan partiel de N sur deux années qui tient compte des apports de N sous forme de matière organique donnerait des résultats nettement positifs sur le traitement FMO. Ce bilan partiel de l'azote montre ainsi une amélioration du statut de l'azote du sol dans la plupart des champs après la culture niébé, comme l'ont observé de nombreux auteurs (Bakayoko et al., 2000 ; Bado et al., 2006 et 2008). Cependant, ces bilans positifs témoignent aussi de la faiblesse initiale des teneurs en N des sols qui a entraîné des rendements (azote exporté) relativement faibles et des proportions élevées d'azote de la plante prélevé dans l'atmosphère. Nous avons observé une corrélation significative et négative entre la teneur en N total des sols et le bilan partiel de l'azote dans les champs (annexe 2). Pour un objectif d'augmentation durable des rendements, il faudrait envisager la restitution d'au moins une partie des fanes, ou du fumier issu des fanes pour améliorer le bilan en azote des champs et accroître significativement la teneur en azote du sol.

I.4. Conclusion partielle

De cette première partie il ressort une grande variabilité des modes de gestion de la fertilité des sols, des rendements du niébé et de la fixation symbiotique de N dans les champs paysans. par rapport à l'essai de Saria. Les variétés améliorées de niébé ont été cultivées dans plus de la moitié des champs. Les champs de niébé ont reçu des fertilisants presque exclusivement minéraux, et les champs de variétés améliorées en ont mieux bénéficié que les variétés locales. Les champs de niébé en milieu paysan ont des teneurs en C et N total et P disponible très faibles, entraînant des rendements très faibles et comparables à ceux mesurés sur le traitement témoin de l'essai de Saria. La composition isotopique des plantes de niébé et des plantes de référence dans l'essai de Saria a montré un plus grand enrichissement en ^{15}N dans les traitements incluant la fumure organique que ceux recevant uniquement des engrains minéraux. Les proportions d'azote provenant de l'atmosphère chez le niébé dans l'essai de Saria ont été plus importantes dans le traitement témoin qui a les caractéristiques chimiques les plus faibles. Le traitement FMO qui est le traitement apportant le plus de nutriments sol, a eu le Ndfa le plus faible. Par contre, les quantités d'azote fixé ont été plus élevées dans le FMO qui a produit les rendements les plus élevés, et plus faibles dans le traitement témoin qui a montré les plus faibles rendements. Les champs en milieu paysan ont eu des Ndfa plus élevés que les traitements de l'essai de Saria. Le Ndfa des variétés locales était supérieur à celui des variétés améliorées. Le bilan partiel de l'azote était positif dans la plupart des champs paysans, montrant ainsi l'impact positif du niébé dans les systèmes de culture. Il apparaît ainsi que les proportions et les quantités d'azote atmosphérique fixé par le niébé semblent être influencées par les modes de gestion de la fertilité des sols.

II. Facteurs influençant la fixation du l'azote symbiotique de l'azote atmosphérique par le niébé

II.1. Influence de la fertilisation et des propriétés chimiques des sols sur la fixation symbiotique de N par le niébé

L'analyse de redondance canonique RDA effectuée en considérant les facteurs de fertilisation et de fertilité des champs est présentée dans la figure 15. Le premier axe canonique explique 69,7% de la variabilité tandis que le second n'explique que 3%. Les variables de fertilisation et de fertilité des champs expliquent de façon significative ($F=9,6$; $p=0.002$ et 72,7% de la variabilité totale sur les deux axes canoniques) le Ndfa et la quantité d'azote fixé. Le premier axe qui est le plus déterminant est constitué par les variables expliquées (Ndfa et N fixé), les teneurs en nutriments (P et N) du sol et les quantités de P et N apportés par les engrains minéraux. On observe une très forte corrélation positive entre la quantité d'azote fixé dans les champs et la teneur en azote et surtout en phosphore disponible du sol. De même, on note une forte corrélation négative entre le Ndfa et la quantité d'azote minérale apportée dans les champs. Les quantités d'amendements organiques apportés dans les champs évoluent dans le même sens que le Ndfa.

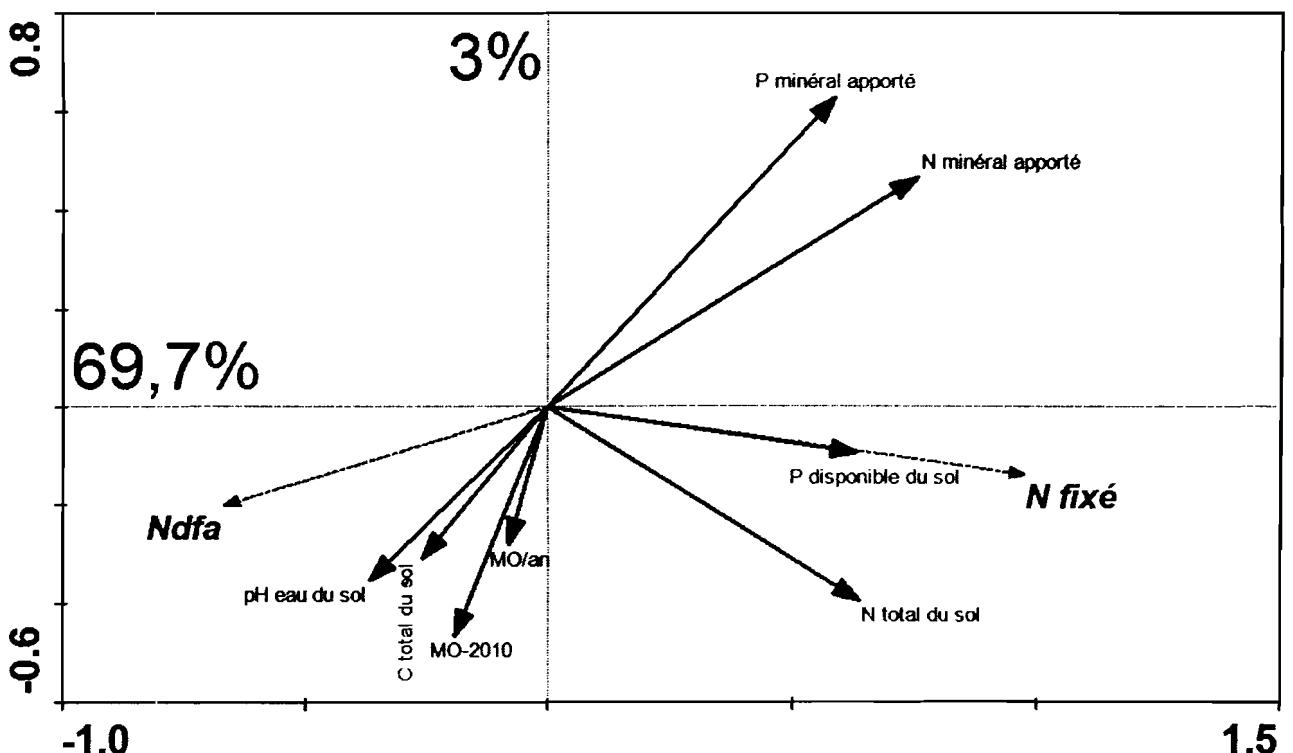


Figure 15: Effets des apports et des teneurs du sol en éléments (C, N total, et P disponible) sur la proportion d'azote provenant de l'atmosphère et sur la quantité d'azote fixé par le niébé.

Mo-2010= quantité de matière organique apportée en 2010 ; **MO/an**= quantité moyenne annuelle de matière organique apportée de 2005 à 2010.

II.2. Influence des modes de gestion des champs sur la fixation symbiotique de N par le niébé

Dans cette analyse, nous considérons comme facteur de gestion des champs, les facteurs qui relèvent des décisions des paysans hormis la fertilisation. Il s'agit du choix de la variété, du type de culture précédent dans le champ (céréale ou légumineuse), du type de travail du sol, et du nombre de sarclages et de traitements insecticides. L'analyse de redondance canonique (figure 16) montre alors que le premier axe canonique explique 45,2% de la variabilité tandis que le second explique 8,1%. Les modes de gestion des champs ont expliqué de façon significative ($F= 3,5$; $p=0,004$ et 52% de la variabilité totale sur ces deux axes canoniques) le Ndfa et la quantité d'azote fixé. Le premier axe est déterminé par les variables expliquées, les

variables de travail du sol (labour, grattage...) et le type de variété utilisé. Le second axe est déterminé par le précédent cultural et le nombre de traitements insecticides. Le Ndfa est fortement et négativement corrélé à la variable variété. Sur le second axe, on observe une évolution en sens opposé de la fixation d'azote (en pourcentage et en quantité) et du nombre de traitements insecticides et le précédent légumineuse.

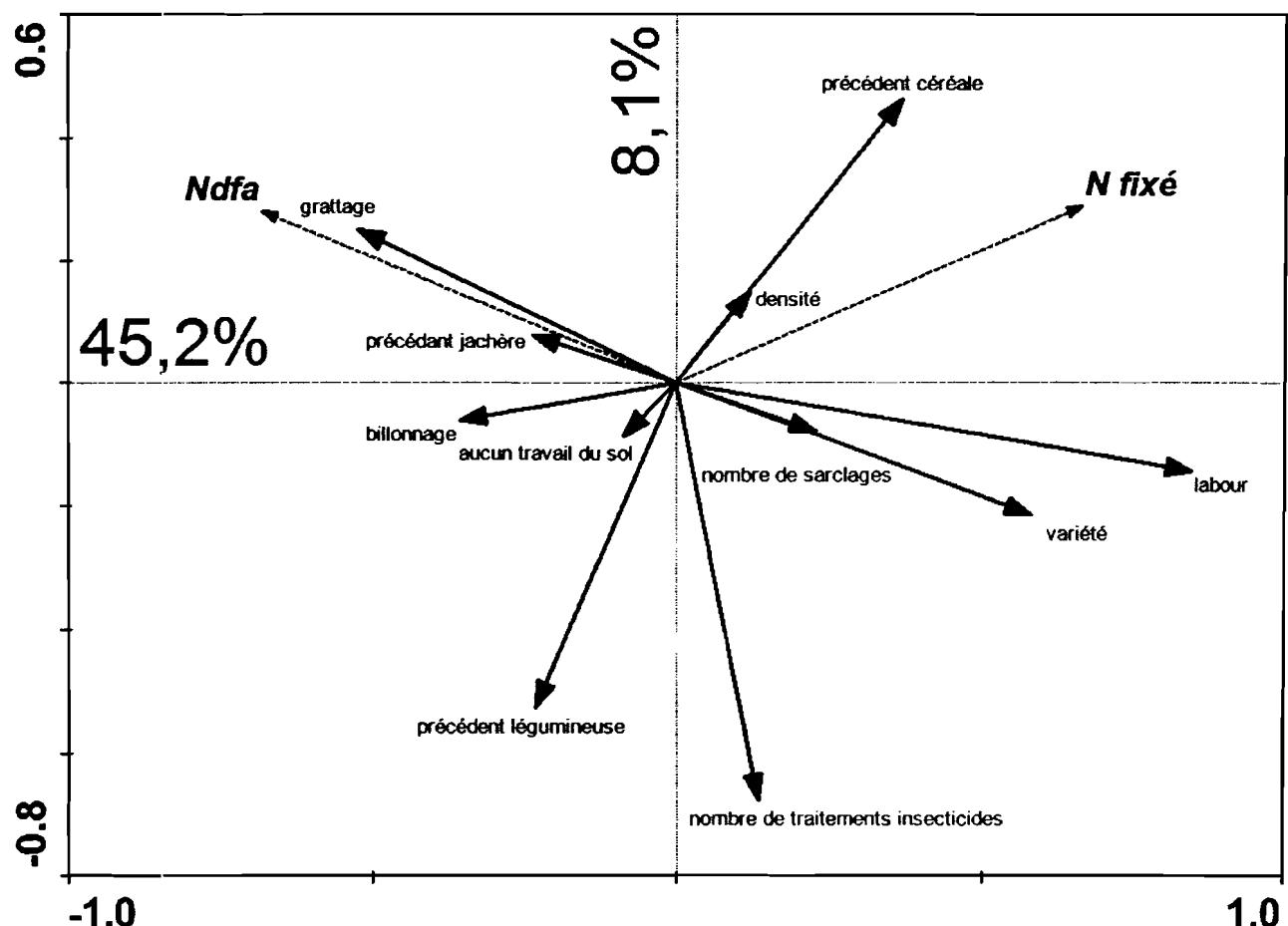


Figure 16: Effet des modes de gestion des champs sur la proportion d'azote provenant de l'atmosphère et sur la quantité d'azote fixé par le niébé

Mo-2010= quantité de matière organique apportée en 2010 ; MO/an= quantité moyenne annuelle de matière organique apportée de 2005 à 2010.

II.3. Influence des paramètres de fertilité des sols et des modes de gestion des champs sur la fixation symbiotique de N chez le niébé

L'analyse de redondance canonique (RDA) effectuée en considérant l'ensemble des facteurs susceptibles d'influencer le Ndfa et la quantité de N fixé est présentée par la figure 17. Le premier axe canonique explique 74,5% de la variabilité, tandis que le second explique 10,5%. L'ensemble des variables expliquent de façon significative ($F= 6,7$; $p= 0,002$ et 85% de la

variabilité sur les deux axes canoniques) le Ndfa et la quantité d'azote fixé. Le premier axe canonique est principalement déterminé par les apports d'éléments nutritifs (N et P). Le second axe est déterminé par les variables de gestion des champs (le nombre de traitements insecticides et le type de précédent cultural. On observe une évolution en sens opposé du Ndfa et des quantités de N fixé selon le premier axe, et de fortes corrélations entre la quantité d'azote fixé dans les champs et le P disponible, le N total du sol ainsi que les apports de P et de N dans les champs.

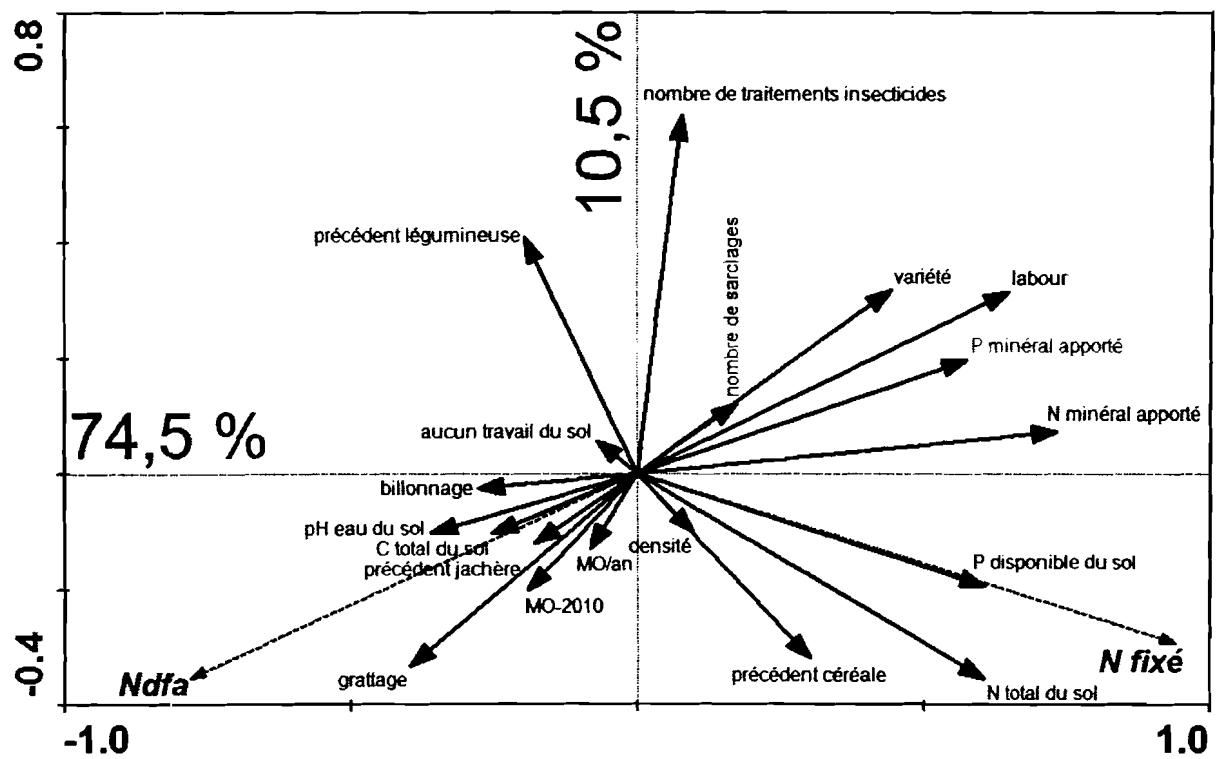


Figure 17: Effet de l'ensemble des facteurs explicatifs sur la proportion d'azote provenant de l'atmosphère et sur les quantités d'azote fixés par le niébé.

II.4. Discussion

La fixation de l'azote atmosphérique par le niébé est sous l'influence de nombreux facteurs liés aux conditions de fertilité du sol (Bado et al., 2006), à la variété cultivée (Adjei-Nsiah et al., 2008 ; Belane et Dakora, 2009 ; Belane et al., 2011) et des facteurs de gestion du champs tels que la rotation (Vesterager et al., 2008). Nos résultats montrent une implication globale de ces facteurs dans la fixation symbiotique de l'azote par le niébé. Les quantités et les formes de fertilisants apportés ainsi que des propriétés chimiques des sols (73% de la variabilité expliquée) sont les premiers facteurs explicatifs du Ndfa et de la quantité d'azote atmosphérique fixé dans les champs de niébé. L'application d'éléments minéraux N et surtout P dans les champs de niébé tend à augmenter les teneurs de ces éléments dans le sol, ce qui permet un accroissement significatif des rendements du niébé. Le P disponible du sol est positivement et significativement corrélé avec les rendements, et aussi avec le N fixé qui est directement lié aux rendements (annexe 2). La corrélation négative entre les quantités d'azote minéral apportées dans les champs et le Ndfa indique une réduction de la dépendance vis-à-vis de l'azote atmosphérique lorsque le niébé est fertilisé, et confirme les effets dépressifs de la fertilisation minérale sur le Ndfa (Salvagiotti et al., 2008). Cependant, les proportions relativement élevées d'azote du niébé qui proviennent de l'atmosphère en milieu paysan s'expliquent par l'effet « starter » que jouent ces fertilisants quand ils sont appliqués à petite dose (Bado et al., 2006). En somme, moins le sol contient de l'azote, plus le Ndfa du niébé est élevé. Cependant, la faible teneur du sol en nutriments, notamment en phosphore, entraîne des rendements faibles, qui eux induisent des quantités d'azote fixé également faibles. L'analyse de redondance canonique (RDA) ne nous a pas permis de mettre en évidence le rôle de la fertilisation organique sur le Ndfa ou les quantités d'azote fixé. La faiblesse de l'utilisation des fumures organiques dans la grande majorité des champs ne permet pas d'en tirer des conclusions pertinentes.

La gestion des champs joue également un rôle déterminant dans la fixation de l'azote. Nos résultats indiquent que l'amélioration variétale tend à réduire le Ndfa et à augmenter les quantités d'azote fixé. Cela s'expliquerait en partie par le fait que ces variétés sont sélectionnées pour des caractéristiques de productivité, d'où le fait qu'elles bénéficient d'une plus grande fertilisation minérale qui réduit leur capacité de fixation. Cela devrait interpeller les améliorateurs à une plus grande prise en compte du potentiel fixateur lors des améliorations variétales.

Les interventions dans le champ qui tendent à améliorer la disponibilité de l'azote pour les plantes semblent entraîner une réduction de la fixation d'azote. Ainsi la monoculture de légumineuses dans les champs semble avoir un effet dépressif sur la fixation symbiotique, surtout sur les quantités de N fixé qui sont opposés au précédent légumineuse dans les champs. Cela montre encore la nécessité de « vraies » rotations dans systèmes de culture. En supposant qu'une légumineuse précédente aurait fixé suffisamment d'azote dans un champ, elle permettrait d'améliorer les teneurs en azote du sol et cela entraînerait une diminution de la fixation symbiotique dans le champ de légumineuse suivante. De plus, la monoculture peut avoir pour conséquences une prolifération des ravageurs (maladie et insectes) dans le champ, et contribuer à une baisse des rendements et des quantités d'azote fixé dans la biomasse végétale. Par contre une rotation céréale-niébé sur la parcelle permet de mieux optimiser la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique chez le niébé. En outre, nos résultats montrent que le travail superficiel du sol tel que le grattage, semble être bénéfique au Ndfa contrairement au travail intense comme le labour du sol. Le labour permet un meilleur ameublissement, une plus grande aération du sol mais aussi, perturbe plus le sol comparativement au grattage superficiel du sol. En conséquence, le labour permet aux plantes une meilleure exploitation des ressources du sol en entraînant un meilleur développement racinaire, et une meilleure minéralisation des constituants organiques du sol. Cela rend les plantes des champs labourés plus dépendantes de l'azote du sol comparativement à celles des champs ayant connu un grattage superficiel du sol, d'où l'évolution en sens contraire au Ndfa. Le grattage du sol en perturbant moins le sol permettrait aux *Rhizobiaceae* d'entrer plus facilement en symbiose avec les plantes, d'où l'évolution du Ndfa dans le même sens que le grattage du sol.

II.5. Conclusion partielle

Les facteurs de fertilisation et de fertilité des champs sont les premiers facteurs explicatifs de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique dans les champs de niébé. Les proportions d'azote atmosphérique fixé sont inversement proportionnelles à la fertilité des champs. Moins il y a d'azote dans le sol, plus le Ndfa est élevé. Les quantités d'azote atmosphérique fixé quant à elles sont dépendantes des rendements des champs qui sont tributaires de la fertilité du sol. Plus il y a d'azote et surtout de phosphore disponible pour les plantes, plus les quantités d'azote fixé sont élevées. Les variétés locales de niébé fixent mieux en proportion que les variétés améliorées. Les rotations céréales-niébé sont plus bénéfiques pour la fixation d'azote du niébé que la monoculture ou les rotations légumineuses niébé.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avions pour objectifs d'étudier la fixation symbiotique d'azote atmosphérique par le niébé en monoculture dans les champs paysans dans le Centre-Ouest du Burkina Faso, et de déterminer les facteurs qui influencent cette fixation. Les proportions et les quantités d'azote fixé ont été mesurées dans des champs paysans, et comparées à celles mesurées sous différents régimes de fertilisation dans l'essai de longue durée de Saria. La fertilité des champs paysans ainsi que celle des traitements de l'essai de Saria ont également été estimées.

Bien qu'il y ait une grande variabilité de fertilité dans les champs paysans, l'observation d'ensemble a montré que ces champs avaient des teneurs en carbone et azote total et en phosphore disponibles très faibles, et similaires à celles relevées dans le traitement témoin de l'essai de Saria. Les rendements mesurés en milieu paysan ont été plus faibles en général, par comparaison aux rendements mesurés sur l'essai de Saria. Ceci serait attribuable à l'influence de la fertilité des sols et aussi au facteur variétal. Dans les champs paysans, les variétés améliorées ont reçu en moyenne plus de fertilisants minéraux que les variétés locales, et ont aussi eu des rendements plus élevés.

Les différents régimes de fertilisation influencent à long terme la fertilité du sol dans l'essai de Saria et aussi les proportions et les quantités d'azote fixé par le niébé. Le traitement témoin qui a les plus faibles teneurs en nutriments a eu le Ndfa le plus élevé dans l'essai de Saria, tandis que le traitement FMO a eu la plus faible proportion d'azote provenant de l'atmosphère. Les Ndfa des champs paysans ont été supérieurs à ceux mesurés dans l'essai de Saria, et plus élevés dans les variétés locales que les variétés améliorées. La quantité d'azote fixé dans l'essai de Saria était plus élevée dans le traitement FMO qui a eu les rendements les plus élevés. Dans les champs paysans, les quantités d'azote fixé ont suivi la variabilité des rendements.

La fixation symbiotique de l'azote chez le niébé est ainsi sous l'influence de plusieurs facteurs. Le Ndfa est inversement lié à la quantité d'azote minéral apporté dans le champ ainsi qu'à la teneur en azote total du sol. Plus il y a d'azote dans le sol pour la plante, moins elle dépend de l'azote atmosphérique pour sa nutrition azotée. La quantité d'azote fixée quant à elle est beaucoup plus influencée par la fertilité, notamment la teneur en P disponible du sol. Plus il y a de phosphore apporté mais surtout disponible aux les plantes moins la

production de biomasse et les quantités d'azote fixé par les plantes sont limitées. Le Ndfa et la quantité d'azote fixé par les champs de niébé évoluent en sens opposé.

Les modes de gestion des champs influencent aussi la fixation de l'azote par le niébé. Les variétés améliorées de niébé fixent moins d'azote en termes de proportions que les variétés locales. Le travail du sol ainsi que le type de rotation cultural effectué dans les champs influencent également la fixation de l'azote.

Les hypothèses de notre étude ont été confirmées. Plus les teneurs en azote total des sols étaient faibles, plus le Ndfa était élevé. Les quantités d'azote atmosphériques fixé augmentent avec les teneurs en P disponible du sol et les rendements du niébé. La troisième hypothèse a également été vérifiée car les variétés améliorées ont effectivement eu des Ndfa généralement inférieurs aux variétés locales. Cependant, cela ne s'attribuerait pas seulement aux caractéristiques intrinsèques des variétés améliorées, mais également aux apports plus importants d'azote minéral dont elles ont bénéficié.

Perspectives

Cette étude a relevé l'influence majeure des teneurs en nutriments du sol sur la proportion et la quantité d'azote fixé dans les champs de niébé. Cependant, nous n'avons pas d'informations sur les teneurs nutriments des plantes pendant la période où elles ont été échantillonnées pour les mesures de la fixation symbiotique. Ces informations auraient permis de voir si certains éléments comme le phosphore et les micronutriments comme le molybdène essentiels à la fixation symbiotique étaient limitant ou pas pour le Ndfa et les quantités d'azote fixé. L'étude a montré que les teneurs élevées en N du sol limitent le Ndfa, mais que des teneurs faibles en nutriments des sols vont limiter les rendements et par conséquent, la quantité d'azote fixé. Il serait alors pertinent dans les recherches futures d'identifier des niveaux de nutriments dans le sol à partir desquels le niébé maximise ses proportions d'azote fixé de l'atmosphère en même temps qu'il produit un rendement optimal, afin de bénéficier au mieux des apports d'azote atmosphérique dans les systèmes de culture.

Références bibliographiques

- Adjei-Nsiah S., Kuyper T. W., Leeuwis C., Abekoe M. K. Cobbinah J., Sakyi-Dawson O. Giller K. E. (2008) Farmers' agronomic and social evaluation of productivity, yield and N₂-fixation in different cowpea varieties and their subsequent residual N effects on a succeeding maize crop Nutr Cycl Agroecosyst 80, pp 199–209
- Afnor., (1981) Détermination du pH. (Association française de normalisation) NF ISO 103 90. In : AFNOR *Qualité des sols*, Paris, pp339-348
- Bado B. V. (2002) Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Laval Québec 184p
- Bado B. V., Bationo A., Cescas M. P.(2006) Assessment of cowpea and groundnut contributions to soil fertility and succeeding sorghum yields in the Guinean savannah zone of Burkina Faso (West Africa) Biol Fertil Soils 43 pp 171-176.
- Bado B. V., Bationo A., Lombo F., Sedogo M. P., Cescas M. P., Sawadogo A., Thio B. (2008) Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols et la productivité des systèmes de cultures. In: *Synthesis of soil, water and nutrient management research in the Volta Basin*. Bationo et al Eds, pp 127-141
- Bagayoko M., Buerkert A., Lung G., Bationo A., Römhild V. (2000) Cereal/legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa: soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nematodes. Plant and Soil 218, pp 103–116.
- Bateman A. S., Kelly S. D. (2007) Fertilizer nitrogen isotope signatures. Isotopes in Environmental and Health Studies 43 (3), pp 237–247
- Bationo A., Kirmet J., Vanlauwe B., Bagayoko M., Koala S., Mokwunye A.U. (2011) Comparative Analysis of the Current and Potential Role of Legumes in Integrated Soil Fertility Management in West and Central Africa In: *Fighting Poverty in Sub-Saharan Africa: The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Management*. Bationo et al eds pp 107-150
- 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), pp. 11450-11458.
- Belane A. K., Dakora F. D. (2009) Measurement of N₂ fixation in 30 cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes under field conditions in Ghana, using the ¹⁵N natural abundance technique. Symbiosis 48, pp 47-56.

Belane A. K., Dakora F. D. (2010) Symbiotic N₂ fixation in 30 field-grown cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes in the Upper West Region of Ghana measured using ¹⁵N natural abundance. Biol Fertil Soils 46, pp 191–198

Buerkert A., Piepho H-P., Bationo A. (2002) Multi-site time-trend analysis of soil fertility management effects on crop production in sub-Saharan West Africa. Expl Agric. 38, pp. 163-183

Cheema Z. A. and Ahmad A. (2000) Effects of urea on the nitrogen fixing capacity and growth of grain legumes, , Int. J. Agri. Biol: 2, (4) pp 388–394.

Douxchamps S., Humbert F-L., van der Hoek R., Mena M., Bernasconi S. M., Schmidt A., Idupulapati R., Frossard E., Oberson A. (2010) Nitrogen balances in farmers' fields under alternative uses of a cover crop legume: a case study from Nicaragua. Nutr Cycl Agroecosyst 88, pp 447–462

Fontes J., Guinko S. (1995) Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Note explicative. Ministère de la coopération française, Toulouse, France 53 pp

Gerzabek M. H., Haberhauer G., Kirchmann H. (2001) Nitrogen distribution and ¹⁵N natural abundances in particle size fractions of a long-term agricultural field experiment. J. Plant Nutr. Soil Sci. 164, pp 475-481

Hardarson G., Danso S. K. A. (1993) Methods for measuring biological nitrogen in grain legumes. Plant and Soil 152, pp 19-23

Herridge D., Peoples M., Boddey R. (2008) Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. Plant Soil 311, pp 1-18

Hien E. (2004). Dynamique du carbone dans un acrisol ferrique du Centre Ouest du Burkina : influence des pratiques culturales sur le stock et la qualité de la matière organique. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 138p

Hogberg P. 1997. ¹⁵N natural abundance in soil–plant systems: Tansley Review No. 95. New Phytologist 137, pp 179–203

Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) : Site internet (www.insd.bf) consulté le 01 Novembre 2012.

Jemo M., Abaidoo R. C., Nolte C., Tchienkoua M., Sanginga N., Horst W. J. (2006) Phosphorus benefits from grain-legume crops to subsequent maize grown on acid soils of southern Cameroon Plant Soil 284, pp 385–397.

Kaboré R., Dabat M-H., Vom Brocke K. (2010) Coordination et durabilité des nouvelles formes de production semencière vivrière au Burkina Faso. Seiny-Boukar L., Boumard P.

(éditeurs scientifiques), 2010 Actes du colloque « Savanes africaines en développement : innover pour durer », 20-23 avril 2009, Garoua, Cameroun. 8p

Kambire S. H., (1994). Systèmes de culture paysan et productivité des sols ferrugineux lessivés du plateau central (B.F.): effets des restitutions organiques. Thèse doctorat troisième cycle, université de Cheikh Anta Diop de Dakar. 188p

Kiba D.I. (2012) Diversité des modes de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la qualité des sols et la production des cultures en zones urbaine, péri-urbaine et rurale au Burkina Faso. Thèse de doctorat unique de l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. 153p

Kouno K., Tuchiya Y., Ando T. (1995) Measurement of soil microbial biomass phosphorus by anion exchange membrane method. Soil Bio. Biochem 27, pp 1353-1357.

Laberge G., Haussmann B. I. G., Ambus P., 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 and Soil 340 pp 369–382.

Lombo F., Segda Z., Gnankambaré Z., Ouandaogo N. (2009) Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs. Tropicultura 27 (2), pp 105-109

M. Giroux et Audesse P. (2004) Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrains de ferme. Agrosol 15(2) pp 107-110.

Naab J. B., Chimphango S. M. B., Dakora, F. D. (2009). N₂ fixation in cowpea plants grown in farmers' fields in the Upper West Region of Ghana, measured using ¹⁵N natural abundance Symbiosis 48, pp 37-46

Nakano A., Uehara Y., Yamauchi A. (2003) Effect of organic and inorganic fertigation on yields, δ¹⁵N values, and δ¹³C values of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Saturn) Plant and Soil 255, pp 343–349

Nyemba R. C., Dakora F. D. (2010) Evaluating N₂ fixation by food grain legumes in farmers' fields in three agro-ecological zones of Zambia, using ¹⁵N natural abundance. Biol Fertil Soils 46, pp 461-470

Oberson A., Nanzer S., Bosshard C., Dubois D., Mäder P., Frossard E. (2007) Symbiotic N₂ fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by ¹⁵N dilution and ¹⁵N natural abundance. Plant Soil 290, pp 69–83.

Odendo M., Bationo A., Kimani S. (2011) Socio-Economic Contribution of Legumes to Livelihoods in Sub-Saharan Africa. In: *Fighting Poverty in Sub-Saharan Africa: The Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Management*. Bationo et al Eds pp 27-46

Timko M. P., Ehlers J. D. Roberts P. A. (2007) Cowpea. In: *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, Pulses Sugar and Tuber Crops*, Kole C ed, Springer-Verlag Berlin Heidelberg pp 49-67.

Traore O. Y. A. (2010) Fertilité chimique des lixivisols et production du sorgho et du niébé dans le Centre Ouest du Burkina Faso : impact des stratégies paysannes en relation avec les conditions socio-économiques des ménages, Mémoire d'ingénieur du développement Rural , option Agronomie, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 62 p.

Unkovich M., Herridge D., Peoples M., Cadisch G., Boddey R., Giller K., Alves B., Chalk P. (2008) Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems. ACIAR, Canberra, Australia, 258p

Unkovich MJ, Pate JS, Sanford P, Armstrong EL (1994) Potential precision of the d15N natural abundance method in the field estimates of nitrogen fixation by crop and pasture legumes in south-west Australia. Aust J Agric Res 45, pp119–132

Vance c. P. (2001) Symbiotic Nitrogen Fixation and Phosphorus Acquisition. Plant Nutrition in a World of Declining Renewable Resources Plant Physiology: 127, pp. 390–397

Vesterager J. M., Nielsen N. E., Høgh-Jensen H. (2008) Effects of cropping history and phosphorus source on yield and nitrogen fixation in sole and intercropped cowpea-maize systems. Nutr Cycl Agroecosyst 80, pp 61–73

Vieira R. F., Mendes I. C., Reis-Junior F. B., Hungria M. (2010) Symbiotic Nitrogen Fixation in Tropical Food Grain Legumes: Current Status. In : *Microbes for Legume Improvement*. Khan M.S. et al. (eds.), pringer-Verlag/Wien, pp 427-472

Zahran H. H. (1999) Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen Fixation under Severe Conditions and in an Arid Climate, Microbiology And Molecular biology Reviews: 63 (4), pp 968–989

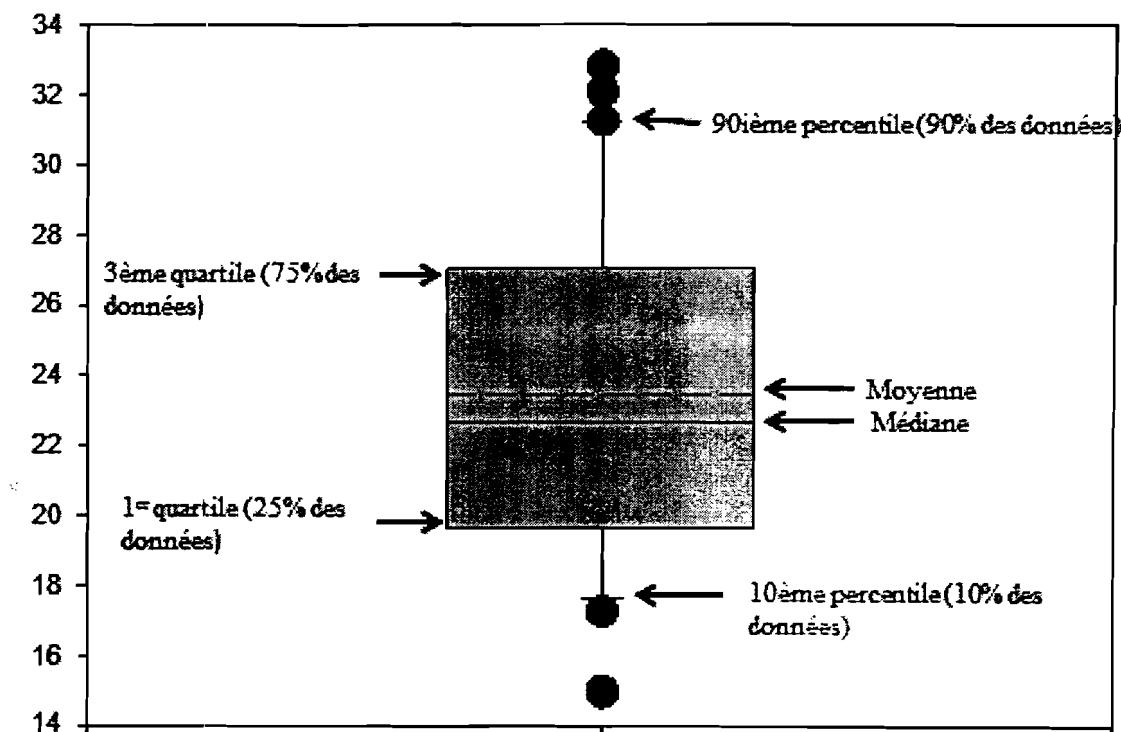
Zoundi J. S., Lalba A., Tiendrebeogo J-P., Bambara D. (2007) Systèmes de cultures améliorés à base de niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) pour une meilleure gestion de la sécurité alimentaire et des ressources naturelles en zone semi-aride du Burkina Faso., Tropicultura 25 (2), pp 87-96

Annexes

Annexe 1 : Description du Box-plot :

Le box-plot est une représentation graphique et descriptive de synthèse de la distribution de données quantitatives. Il qui trace les données graphiques comme une boite représentant les valeurs statistiques repères. Les bases inférieure et supérieur de la boite indiquent respectivement le 25ième et le 75ième percentile. Les barres d'erreurs verticaux inférieurs et supérieur appelés moustaches indiquent respectivement les 10ième 90ième et percentiles. La moyenne (en traits discontinus dans l'exemple) peut également être représentée.

Exemple



Annexe 2 : Coefficients de corrélations (r) et probabilité (p) entre les quantités de P et de N minéral apporté dans les champs, le C, N total et P résine des sols, le Ndfa (%), le N fixé, et les rendements graines et fanes des champs.

		P apporté	N apporté	C total	N total	P résine	Ndfa (%)	N fixé
C total	r	-0,282	-0,266					
	p	0,086	0,107					
N total	r	0,126	0,342*	0,549**				
	p	0,450	0,036	0,000				
P résine	r	0,401*	0,445**	0,063	0,486**			
	p	0,013	0,005	0,706	0,002			
Ndfa (%)	r	-0,517**	-0,596**	0,234	-0,346*	-0,403*		
	p	0,001	0,000	0,158	0,033	0,012		
N fixé	r	0,427**	0,667**	-0,183	0,700**	0,595**	-0,601**	
	p	0,007	0,000	0,271	0,000	.000	0,000	
Bilan N	r	0,308	0,067	-0,252	-0,411*	-0,088	0,382*	-0,277
	p	0,060	0,689	0,127	0,010	0,600	0,018	0,092
Rendement	r	0,526**	0,383*	-0,322*	0,156	0,420**	-0,455**	0,560**
graines	p	0,001	0,018	0,049	0,351	0,009	0,004	0,000
Rendements	r	0,491**	0,212	-0,164	0,038	0,414**	-0,203	0,326*
fanès	p	0,002	0,200	0,326	0,821	0,010	0,221	0,046

* : corrélation significative au seuil de probabilité p<0,05

** : corrélation significative au seuil de probabilité p<0,01

Annexe 3 : Fiche d'enquête utilisée en milieu paysan

Fiche d'enquête pour la caractérisation des stratégies de fertilisation appliquées

Identification du producteur

Code questionnaire :

Nom :

Prénom :

Age :

Sexe :

Localité :

Caractéristiques du champ

Superficie du champ (ha) :

Caractéristiques de la variété de Niébé utilisée en 2010

Variété (cocher) :

Locale

Améliorée

Port (cocher) :

Erigé

Rampant

Couleur des fleurs (cocher)

Jaune

Blanche

Couleur des grains (cocher)

Blanche

Autre

Historique du champ

Année	Culture pratiqué	Fertilisation appliquée						
		Fumier (Nombre de charrette)	Compost (Nombre de charrette)	Paille (Nombre de charrette)	Déchets ménagers (Kg)	Engrais NPK (Kg)	Engrais Urée (Kg)	Autre (lequel ?)
2010	Niébé pur							
2009								
2008								
2007								
2006								
2005								

Problèmes particuliers rencontrés dans le champ :