

Boubié Vincent BADO

**RÔLE DES LÉGUMINEUSES SUR LA FERTILITÉ
DES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX DES
ZONES GUINÉENNE ET SOUDANIENNE DU
BURKINA FASO**

Thèse
présentée
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de Philosophiae Doctor (Ph. D.)

Département des sols et de génie agroalimentaire
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

DECEMBRE 2002

© Boubié Vincent Bado, 2002

Résumé court

Les cultures légumineuses fixatrices d'azote constituent une alternative pour améliorer la nutrition azotée. Cette recherche avait pour objectif d'évaluer les contributions en azote de l'arachide (*Arachis hypogea*) et du niébé (*Vigna unguiculata*) et leurs impacts sur la nutrition azotée et les rendements du sorgho (*Sorghum bicolor*) et du cotonnier (*Gossypium spp*) subséquents. Les expérimentations ont été conduites au Burkina Faso dans les zones guinéenne à Farakô-Ba et soudanienne à Kouaré de 1993 à 2001. La fixation symbiotique de l'azote a été mesurée par la méthode de la dilution isotopique.

L'arachide fixait 8 à 23 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère, couvrant 27 à 34 % de ses besoins en azote. Le niébé fixait 50 à 115 kg N ha⁻¹, soit 52 à 56 % de ses besoins en azote. Comparativement à l'engrais minéral seul, les rendements et l'azote fixé par les deux légumineuses augmentaient lorsque l'engrais minéral était associé avec le phosphate naturel, la dolomie ou le fumier. Les précédents légumineuses augmentaient l'azote minéral du sol de 13 à 40 % et le sorgho prélevait 2 à 3 fois plus d'azote, entraînant des augmentations de rendements de 60 à 300 % par rapport à la monoculture. À Kouaré, les sols des rotations Jachère-Sorgho et Niébé-Sorgho fournissaient plus d'azote au sorgho que ceux de la monoculture de sorgho et augmentaient les coefficients d'utilisation de l'engrais azoté de 9 et 5 unités respectivement. À Farakô-Ba, les sols des rotations Jachère-Sorgho, Arachide-Coton-Sorgho et Coton-Arachide-Sorgho fournissaient plus d'azote au sorgho que ceux de la monoculture de sorgho et augmentaient les coefficients d'utilisation de l'engrais azoté de 13, 25 et 32 unités respectivement. Comparativement au sol initial, toutes les rotations diminuaient le carbone organique à Kouaré et à Farakô-Ba de 52 à 56 % et de 29 à 34 % respectivement. Le sol ainsi que le sorgho des rotations comportant l'arachide étaient moins infectés par les nématodes alors que ceux des rotations Niébé-Sorgho étaient plus infectés comparativement à la monoculture de sorgho.

Les résultats ont montré que les rotations comportant des légumineuses améliorent la nutrition azotée et les rendements en augmentant l'azote disponible dans le sol et le recouvrement de l'azote apporté par l'engrais. Un précédent niébé ou arachide équivaut à une application de 25 Kg N ha⁻¹ d'engrais minéral pour la culture succédant à la légumineuse. Les précédents arachide et niébé augmentent le potentiel de rendement du sorgho subséquent. Après l'arachide et le niébé, les doses d'engrais azoté nécessaires pour atteindre les rendements optimaux de sorgho étaient de 51 et 58 kg N ha⁻¹ respectivement. La nutrition azotée et la productivité des systèmes traditionnels peuvent être améliorées à moindre coût par les rotations avec les cultures légumineuses en utilisant les amendements organiques, la dolomie et les phosphates naturels.

Mots clés : Engrais, Azote, légumineuses, Rotation, Sorgho, sol

M. P. CESCAS

B. V. BADO

Directeur de la thèse

Candidat au Doctorat

Résumé Long

Les cultures légumineuses fixatrices d'azote pourraient être une alternative pour améliorer la nutrition azotée et augmenter les rendements des cultures. Cette recherche avait pour objectif d'évaluer les contributions en azote de l'arachide (*Arachis hypogea*) et du niébé (*Vigna unguiculata*) et leurs impacts sur la nutrition azotée et les rendements du sorgho (*Sorghum bicolor*) et du cotonnier (*Gossypium spp*) en rotation. Les expérimentations ont été conduites au Burkina Faso dans les zones guinéenne à Farakô-Ba (4° 20' Ouest, 11° 6' Nord et 405 m d'altitude) et soudanienne à Kouaré (11° 59' Nord, 0° 19' Est et 850 m d'altitude). La fixation symbiotique de l'azote (FSA), l'influence des deux légumineuses sur l'azote minéral du sol, les rendements des cultures et les nématodes ont été évalués à Farakô-Ba par un essai factoriel 7x6 correspondant à 7 rotations culturales et 6 fumures utilisées respectivement comme premier et second facteur. Un dispositif en split plot avec 4 répétitions a été utilisé. La FSA a été mesurée avec les méthodes de la différence d'azote total (DNT) et de la dilution isotopique (DI). Les valeurs de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) ont été mesurées à Farakô-Ba sur deux années. À la première année (2000), un dispositif en blocs de Fisher avec 4 cultures (arachide, niébé, maïs et sorgho) en 4 répétitions était utilisé. À la deuxième année (2001), chaque parcelle était subdivisée en cinq sous parcelles recevant 5 doses d'engrais azoté (0, 20, 40, 60 et 80 kg N ha⁻¹). Les effets à long terme des légumineuses sur les cultures subséquentes, le recouvrement de l'azote, les propriétés chimiques du sol et les nématodes ont été étudiés par deux expérimentations de longue durée à Farakô-Ba et Kouaré, avec des systèmes de rotations spécifiques à chaque site. À Kouaré, le dispositif était un factoriel 5x6 correspondant à 5 rotations et 6 fumures utilisées respectivement comme premier et second facteur. À Farakô-Ba le dispositif était un factoriel 10x8 correspondant à 10 rotations et 8 fumures utilisées respectivement comme premier et second facteur. Une disposition en split plot avec 4 répétitions était utilisée sur les deux sites.

Les quantités d'azote fixé par les légumineuses variaient selon les années. L'arachide fixait en moyenne 8 à 23 kg N ha⁻¹, couvrant 27 à 34 % de ses besoins en N. Lorsque le sol était amendé par le phosphate naturel (PN), la dolomie ou le fumier, l'arachide fixait

respectivement 5, 6 ou 12 fois plus d'azote dans l'atmosphère comparativement à la fumure minérale seule. Le niébé fixait 50 à 115 kg N ha⁻¹, soit 52 à 56 % de ses besoins en azote. Comparativement à l'engrais minéral seul, l'association de l'engrais minéral avec le PN, la dolomie et le fumier augmentaient l'azote fixé par le niébé de 50, 120 et 130% respectivement. La méthode de la DI a donné des résultats plus précis que la méthode de la DNT. Comparativement à la monoculture de sorgho, les précédents arachide et niébé augmentaient l'azote minéral de 13 à 40 % et de 20 à 25 % respectivement. Après les précédents arachide et niébé, le sorgho prélevait 2 à 3 fois plus d'azote, 2 fois plus de P et ses rendements augmentaient de 60 à 300 % respectivement. L'arachide et le niébé avaient des VRFA de 32 et 25 Kg N ha⁻¹ respectivement. À Kouaré, les rotations Niébé-Sorgho et Jachère-Sorgho augmentaient respectivement l'azote provenant du sol de 14 et 88 % et le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté de 9 et 5 unités comparativement à la monoculture. À Farakô-Ba, les rotations Coton-Arachide-Sorgho et Jachère-Sorgho augmentaient respectivement l'azote provenant du sol de 150 et 130 % et le coefficient d'utilisation de l'engrais azoté de 32 et 13 unités respectivement. Le sol ainsi que le sorgho de la rotation Arachide-Sorgho étaient 11 et 18 fois moins infectés par les nématodes alors que dans la rotation Niébé-Sorgho ils étaient 2 fois plus infectés comparativement à la monoculture de sorgho. Les résultats indiquent que les rotations comportant des légumineuses augmentent l'azote disponible, améliorent l'utilisation de l'engrais et valorisent mieux les faibles doses d'engrais utilisées par les producteurs. Après les précédents arachide et niébé, les doses d'engrais azoté nécessaires pour atteindre les rendements maximums de sorgho étaient de 51 et 58 kg N ha⁻¹ respectivement. La FSA, la nutrition azotée et la productivité des systèmes traditionnels peuvent être améliorées à moindre coûts par les rotations avec les cultures légumineuses et l'utilisation de la dolomie, des amendements organiques et des phosphates naturels qui sont mieux valorisés par les légumineuses.

Mots clés : Engrais, Azote, légumineuses, Rotation, Sorgho, sol

M. P. CESCAS

B. V. BADO

Directeur de la thèse

Candidat au Doctorat

Abstract

The N₂-fixing-legume crops and local agro-mineral resources like rock phosphates (PR) or dolomite are some cheaper means to improve smallholder's system productivity. This research aims to evaluate the N contribution of groundnut (*Arachis hypogea*) and cowpea (*Vigna unguiculata*) and their impacts on the succeeding sorghum (*Sorghum bicolor*) and cotton (*Gossypium spp*) yields. Isotopic dilution method was used for biological nitrogen measurement.

Groundnut fixed 8 to 23 kg N ha⁻¹ and the percentage of N derived from the atmosphere varied from 27 to 34 %. Cowpea fixed 50 to 115 kg N ha⁻¹ and the percentage of N derived from the atmosphere varied from 52 to 56 %. Compared to the mineral NPK fertilizer alone, the legumes fixed more nitrogen from the atmosphere when PR, dolomite or manure were applied with mineral fertilizer. Compared to continuous sorghum, Legume-Sorghum rotations increased soil mineral nitrogen and N absorption by sorghum. Legume-Sorghum rotations increased sorghum grain yield from 60 to 300 % compared to continuous sorghum. The N fertilizer equivalencies of cowpea and groundnut were 25 and 35 kg N ha⁻¹ respectively.

At Kouaré, the soils of Fallow-Sorghum and Cowpea-Sorghum rotations provided more nitrogen to sorghum and increased fertilizer N use efficiency from 9 and 5 units respectively compared to continuous sorghum. At Farakô-Ba, the soils of Fallow-Sorghum, Groundnut-Cotton-Sorghum and Cotton-Groundnut-Sorghum rotations provided more nitrogen to sorghum and increased fertilizer N use efficiency from 13, 25 and 32 units respectively compared to continuous sorghum. Compared to the original soil, all rotations decreased soil organic carbon at Kouaré and Farakô-Ba from 52 to 56 % and from 29 to 34 % respectively. Groundnut decreased soil and sorghum roots infection by nematodes but cowpea increased nematode infection.

The results showed that crop rotations with groundnut or cowpea increased N nutrition, N fertilizer use efficiency, leading to a better use of the small doses of fertilizers used by smallholder farmers. Legume crop, PN, dolomite and organic amendments are cheaper means to increase BNF, N nutrition and traditional system productivities.

Key words: Fertilizer, Nitrogen, Legume, Crop rotations, Sorghum, Soil

M. P. CESCAS

B. V. BADO

Directeur de la thèse

Candidat au Doctorat

Avant-propos

Ce travail a bénéficié du soutien de plusieurs personnes qu'il me fait plaisir de remercier.

Je ne saurai remercier assez mon Directeur Général et superviseur scientifique, le Dr Michel SEDOGO qui a su apporter son expérience et toutes les facilités administratives pour exécuter ce travail. À travers lui et notre structure nationale de recherche, je remercie en particulier le Dr Paco SEREME, Directeur de l'INERA qui a approuvé la mise à disposition des ressources et le cadre scientifique nécessaire à ce travail.

Par ses grandes qualités humaines, le Professeur Michel Pierre CESCAS, mon Directeur de thèse a su me guider et m'encourager depuis mes cours de maîtrise et je le remercie pour avoir accepté la supervision technique et tout ce qu'il a fait pour rendre possible ce travail.

Cette recherche est le fruit d'une collaboration fructueuse de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles du Burkina Faso (INERA) avec trois institutions partenaires : l'Agence Internationale d'Énergie Atomique (AIEA), l'Institut International de Recherche sur les Cultures des zones Tropicales Semi-Arides (ICRISAT) et l'institut de recherche sur la Biologie et la Fertilité des Sols Tropicaux (TSBF). Elle a été initiée au départ par l'INERA et l'ICRISAT pour devenir par la suite un travail collaboratif des trois institutions. Je remercie mon chef de Département le Dr François LOMPO, qui m'a autorisé à approfondir les travaux de ce programme collaboratif de recherche par la présente thèse.

L'AIEA a grandement contribué au succès de ce travail en m'accordant une subvention de recherche comprenant la fourniture des isotopes et les analyses des échantillons dans ses laboratoires. L'ICRISAT a assuré un soutien financier à l'installation et à la conduite des essais de longue durée sur les deux sites d'expérimentation depuis 1993. TSBF a apporté son soutien financier et l'analyse de certains échantillons dans ses laboratoires à partir de 2001. Au nom des responsables de notre système national de recherche, je remercie ces

institutions partenaires. Je remercie tout particulièrement le Dr Felipe ZAPATA et le personnel du laboratoire de l'AIEA à Vienne pour leur précieuse contribution.

Mon superviseur scientifique, le Dr André BATIONO a été au début et à la fin, le grand animateur de la fructueuse collaboration entre l'INERA et l'ICRISAT et par elle, le concepteur scientifique de cette recherche. Il a su toujours se dévouer pendant les périodes difficiles qu'ont connu nos deux institutions pour apporter sa contribution à la sauvegarde de notre patrimoine commun que constitue les essais de longue durée. Avec sa grande expérience, il m'a apporté à tout moment de précieux conseils dans l'orientation et la conduite de mes travaux. Je ne saurai le remercier assez pour tout ce qu'il a fait pour nous permettre d'atteindre ces résultats.

Mon épouse Koti m'a apporté toute l'assistance nécessaire. Elle a supporté mes longues périodes d'absence. Qu'elle trouve dans ce travail le fruit de nos efforts.

Je remercie du fond du cœur Vincent GERARDIN et son épouse Antoinette, ma famille d'adoption à Québec pour leur disponibilité et tout ce qu'ils ont fait pour moi pendant mes séjours au Canada. Je remercie également Jean Pierre SANOU et son épouse Suzanne.

Mes collègues, Dr Abdousalam SAWADOGO et Bouma THIO m'ont apporté leur expertise dans l'extraction, la détermination et l'évaluation des nématodes. Je leur témoigne toute ma reconnaissance pour cette précieuse contribution.

Je remercie mes collègues Dr Victor HIEN, chef du laboratoire sol plante, Zacharia GNAKAMBARI et ses collègues du laboratoire, mes techniciens Tiékoura TRAORÉ, Amoro OUATTARA et BAMBA pour leur contribution. Je remercie mon collègue Dr Ouola TRAORÉ qui m'a apporté à tout moment son assistance dans mes charges administratives pendant mes différents séjours à l'université Laval.

C'est le Dr Saïdou KOALA qui a fortement appuyé et favorisé l'obtention d'une première bourse d'étude auprès du Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI) et qui m'a permis d'obtenir le diplôme de maîtrise indispensable pour une inscription à la thèse. À lui et à son institution, je témoigne toute ma reconnaissance pour la place importante qu'ils occupent dans ma carrière.

*Je dédie cette thèse à mes enfants Alix et
Serge, à ma mère Eyomboé et à la mémoire
de mon père Yigny*

Table des matières

Résumé court	i
Résumé Long	ii
Abstract.....	iv
Avant-propos	v
Liste des tableaux	xi
Liste des figures.....	xiii
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue de littérature.....	6
1.1 L'importance de l'azote dans la nutrition des plantes	7
1.2 Les principales sources d'azote	7
1.2.1 Le sol	7
1.2.2 Les amendements organiques.....	9
1.2.3 Les engrais minéraux.....	10
1.2.4 Les plantes fixatrices d'azote	11
1.2.4.1 La fixation symbiotique de l'azote	11
1.2.4.2 Évaluation des contributions en azote des légumineuses	13
1.2.4.3 Importance des légumineuses dans les systèmes de culture.....	19
1.3 Le recouvrement de l'azote	20
Chapitre 2 : Sites d'étude, matériel et méthodes	23
2.1 Les sites d'étude	24
2.1.1 Le site de Farako-Bâ.....	24
2.1.2 Le site de Kouaré.....	25
2.2 Matériel d'étude.....	28
2.2.1 Matériel végétal	28
2.2.2 Engrais et amendements	29
2.3 Méthodes d'étude.....	31
2.3.1 Effets des légumineuses sur l'azote et le sorgho subséquent	31
2.3.1.1 Dispositif expérimental.....	32
2.3.1.2 Évaluation de la fixation symbiotique de l'azote	33
2.3.1.3 Suivi de l'azote minéral du sol	36
2.3.1.4 Évaluation de la population des nématodes.....	36
2.3.2 Valeur de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses	37
2.3.2.1 L'expérimentation agronomique	37
2.3.2.2 Détermination des valeurs de remplacement en fertilisant azoté	39

2.3.2.3 Détermination des besoins en engrais azoté selon le précédent cultural ...	40
2.3.3 Effets à long terme des légumineuses sur les cultures et le sol	40
2.3.3.1 Les dispositifs expérimentaux	41
Farako-Bâ	43
Kouaré	43
2.3.3.2 L'absorption de N et P et le recouvrement de N	44
2.3.3.4 Suivi de l'azote minéral du sol	46
2.3.3.5 Les propriétés chimiques du sol et les nématodes	46
2.3.4 Méthodes d'analyses.....	47
2.3.4.1 Analyse des sols et des plantes	47
2.3.4.2 Extraction et évaluation des nématodes.....	48
Chapitre 3 : Résultats et discussions.....	49
3.1 Rendements des légumineuses et fixation symbiotique de l'azote.....	50
3.1.1 Les rendements des légumineuses	50
3.1.1.1 L'arachide.....	50
3.1.1.2 Le niébé	51
3.1.1.3 Discussion.....	53
3.1.2 La fixation symbiotique de l'azote	54
3.1.2.1 La fixation de l'azote par les légumineuses.....	54
3.1.2.2 Influence des fumures sur la fixation symbiotique de l'azote	58
3.2 Influence des légumineuses sur les rendements des cultures subséquentes	64
3.2.1 Influence des légumineuses sur les rendements du sorgho subséquent.....	64
3.2.1.1 Effets des fumures	65
3.2.1.2 Effets des précédents légumineuses	67
3.2.2 Effets à long terme des rotations sur les rendements des cultures.....	70
3.2.2.1 Site de Kouaré	70
3.2.2.2 Site de Farako-Bâ	78
3.2.3 Discussion.....	87
3.3 Prélèvements de N et P et recouvrement de l'azote par le sorgho.....	90
3.3.1 Site de Kouaré	91
3.3.2 Site de Farakô-Ba	92
3.3.2.1 Prélèvement et recouvrement de l'azote.....	92
3.3.2.2 Prélèvement du phosphore.....	96
3.3.3 Bilan partiel de l'azote.....	97
3.3.4 Discussion.....	99
3.4 Valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses.....	102
3.4.1 Les valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses.....	102
3.4.2 Précédent légumineuses et besoins en engrais azoté du sorgho	105
3.4.3 Discussion.....	109
3.5 Influence des légumineuses sur les propriétés du sol	111
3.5.1 L'azote minéral du sol	112
3.5.1.1 Effets des précédents légumineuses sur l'azote minéral.....	112
3.5.1.2 Effets à long terme des légumineuses sur l'azote minéral.....	118
3.5.1.3 Discussion.....	121

3.5.2 Les propriétés chimiques des sols.....	122
3.5.2.1 Les fumures	122
3.5.2.2 Les rotations culturales	127
3.5.3 Influence des légumineuses sur les nématodes.....	130
3.5.3.1 Effets des précédents légumineuses sur les nématodes	131
3.5.3.2 Effets à long terme des légumineuses sur les nématodes	134
3.5.3.3 Discussion.....	139
Discussion générale	141
Conclusion	148
Références bibliographiques.....	152
Annexes	167

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols de Farakô-Ba et Kouaré.....	25
Tableau 2 : Liste des cultures et des variétés utilisées par site.....	29
Tableau 3 : Doses d'éléments nutritifs apportés par les engrais minéraux selon les cultures.....	30
Tableau 4 : Compositions chimiques moyennes du fumier et du compost utilisés.....	30
Tableau 5 : Composition chimique de la dolomie et du phosphate naturel.....	31
Tableau 6 : Liste des rotations utilisées dans l'études des effets des précédents légumineuses.....	33
Tableau 7 : Liste des rotations utilisées pour mesurer les valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses.....	39
Tableau 8 : Liste des rotations culturales utilisées dans les expérimentations de longue durée de Farakô-Ba et Kouaré.....	43
Tableau 9 : Effets des fumures sur les rendements (kg ha^{-1}) de l'arachide et du niébé à Farako-Bâ.....	52
Tableau 10 : Azote total et pourcentage d'azote fixé par l'arachide et le niébé selon les méthodes de la dilution isotopique et de la différence d'azote en 2000 et 2001 à Farako-Bâ.....	56
Tableau 11 : Influence des fumures sur les rendements en grains et en paille du sorgho à Farako-Bâ.....	66
Tableau 12 : Effets des fumures sur les rendements du sorgho pendant 7 années à Kouaré.....	74
Tableau 13 : Effets des rotations sur les rendements du sorgho pendant 6 années à Kouaré.....	75
Tableau 14 : Analyses pluriannuelles des effets des fumures et des rotations sur les rendements en grains du sorgho pendant 6 années (1995-2000) à Kouaré.....	77
Tableau 15 : Influence des fumures sur les rendements en grains du sorgho (kg ha^{-1}) pendant 9 années (1993-2001) à Farakô-Ba.....	80

Tableau 16 : Influence des rotations sur les rendements du sorgho (kg ha ⁻¹) pendant 8 années (1995-2000) à Farako-Bâ.....	81
Tableau 17 : Analyse pluriannuelle des effets des fumures et des rotations sur les rendements en grains du sorgho (kg ha ⁻¹) pendant 9 (1993-2001) années à Farako-Bâ.....	83
Tableau 18 : Analyse pluriannuelle des effets des fumures et des rotations sur les rendements du cotonnier (kg ha ⁻¹) pendant 9 années (1993-2001) à Farakô-Ba.....	86
Tableau 19 : Influence des rotations sur le prélèvement et le recouvrement de l'azote par le sorgho à Kouaré 2001	92
Tableau 20 : Influence des fumures et des rotations culturales sur le prélèvement et le recouvrement de l'azote par le sorgho	95
Tableau 21 : Influence des fumures sur les prélèvements de l'azote (kg N ha ⁻¹) par l'arachide, le niébé et le sorgho et le bilan en azote à Farako-Bâ en 2001	99
Tableau 22 : Fonctions de réponse du sorgho à l'azote selon le précédent et valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses.....	105
Tableau 23 : Influence des précédents culturaux sur les besoins en engrais azoté et les rendements du sorgho.....	109
Tableau 24 : Influence des fumures et des rotations sur les propriétés chimiques du sol après 7 années de culture (1994-2000) à Kouaré (horizon 0-20 cm).	125
Tableau 25 : Influence des fumures et des rotations sur les propriétés chimiques du sol après 9 années de culture à Farakô-Ba (horizon 0-20 cm).	126
Tableau 26 : Influence des précédents culturaux et des fumures sur l'infection des racines du sorgho par les nématodes à 30 et 60 jours après le semis à Farako-Bâ en 2001	132
Tableau 27 : Influence des rotations culturales après 9 années de culture sur l'infection du sol par les nématodes au semis, à 30, 60 et 90 jours après semis à Farako-Bâ (nombre/dm ³ de sol)	135
Tableau 28 : Influence des précédents culturaux après 9 années de culture sur l'infection des racines du sorgho par les nématodes 30, 60 et 90 jours après semis à Farako-Bâ (nombre/g de racine).....	137

Liste des figures

Figure 1 : Pluviométrie annuelle(a) et nombre de jours de pluies (b) du site de Farakô-Ba de 1993 à 2001.....	26
Figure 2 : Pluviométrie annuelle(a) et nombre de jours de pluies (b) du site de Kouaré de 1994 à 2001.....	27
Figure 3 : Influence des fumures sur l'azote total (a) et le pourcentage d'azote fixé par l'arachide en 2001 à Farakô-Ba.....	60
Figure 4 : Influence des fumures sur l'azote total (a) et le pourcentage d'azote (b) fixé par le niébé en 2001 à Farakô-Ba.....	61
Figure 5 : Influence des précédents sorgho, niébé et arachide sur les rendements en grain (a) et en paille (b) du sorgho à Farakô-Ba en 2001.....	69
Figure 6 : Influence des rotations culturales après 9 années de culture sur le phosphore total absorbé par le sorgho en 2001 à Farakô-Ba	96
Figure 7 : Effets des précédents maïs, arachide et niébé sur la réponse du sorgho à l'engrais azoté en 2001 à Farakô-Ba.....	104
Figure 8 : Détermination des besoins en engrais azoté du sorgho selon le précédent cultural.....	108
Figure 9 : Influence des fumures sur l'azote minéral du sol au semis (a) et 7 jours après le semis	114
Figure 10 : Influence des légumineuses sur l'azote minéral du sol au semis (a) et 7 jours après le semis (b) en 2001 à Farakô-Ba	117
Figure 11 : Influence des fumures (a) et des rotations (b) sur l'azote minéral du sol pendant les 45 premiers jours après le semis en 2001 à Farakô-Ba.....	120
Figure 12 : Influence des précédents culturaux sur l'infection du sol par les nématodes à 30 (a) et 90 jours (b) après le semis à Farakô-Ba en 2001.....	133
Figure 13 : Influence des rotations culturales sur l'infection du sol (a) et des racine du sorgho (b) par les nématodes au semis, à 30 jours, 60 et 90 jours après	138

Introduction

L'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne est caractérisée par sa faible productivité. Au Burkina Faso, les faibles rendements des cultures sont souvent expliqués par les conditions pluviométriques défavorables, la pauvreté naturelle des sols en éléments nutritifs et la faible utilisation des engrais.

La forte croissance démographique des dernières années a entraîné une forte pression sur les ressources en terres cultivables. L'augmentation de la population est accompagnée d'une augmentation du cheptel entraînant du même coup une augmentation de la demande en produits végétaux utiles à l'homme et à l'animal. Cette forte pression sur le couvert végétal influence la capacité des sols à produire la biomasse nécessaire aux besoins d'une population de plus en plus nombreuse. Dans un tel contexte, la jachère qui était le moyen traditionnel de restauration de la fertilité des sols est moins pratiquée à cause de la forte demande en terres cultivables. De nombreuses expérimentations de longue durée ont montré qu'une gestion rationnelle des engrais minéraux et des amendements organiques permettait d'augmenter les rendements des cultures et de maintenir durablement la fertilité des sols (Sédogo, 1981, 1993 ; Pichot et *al.*, 1981; Berger et *al.*, 1987 ; Pieri, 1989; Bationo et Mokwunye, 1991 b; Bado et *al.*, 1997).

L'efficacité parfois spectaculaire des engrais organiques et minéraux a été bien démontrée sur les sols pauvres en éléments nutritifs du Burkina Faso (Pichot et al, 1981 ; Bado *et al.*, 1997). Mais l'utilisation des engrais demeure limitée pour plusieurs raisons résumées par McIntire (1986) et Stoorvogel et Smaling (1990). Dans l'agriculture de subsistance des pays d'Afrique Subsaharienne comme le Burkina Faso, les engrais minéraux sont très peu utilisés surtout à cause de leurs coûts élevés comparativement aux faibles revenus des producteurs. Sur la base des statistiques de la FAO, McIntire (1986) rapporte que les producteurs africains utilisaient seulement 5.9 kg ha⁻¹ d'engrais durant les années 1978 à 1982. À titre de comparaison, les doses moyennes d'application des engrais dans le monde étaient de 77.9 kg ha⁻¹ en 1982 et les producteurs d'Asie et d'Amérique Latine utilisaient 72.5 et 26.3 kg ha⁻¹ respectivement (McIntire, 1986). Plus récemment,

Stoorvogel et Smaling (1990) rapportent que l'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne utilise à peine 8 kg ha^{-1} .

L'utilisation des engrais organiques est également faible car l'agriculture n'est pas systématiquement intégrée avec l'élevage. Il s'agit de deux types d'activités distinctes pratiquées par des acteurs différents. L'agriculteur ne pratique pas systématiquement l'élevage de sorte qu'il ne peut disposer des amendements organiques comme le fumier pour fertiliser son champ. Après les récoltes, les résidus de récolte sont principalement consommés durant la saison sèche par les animaux transhumants, ce qui correspond à une exportation d'éléments nutritifs des champs.

Cette agriculture extensive à très faibles intrants sans recyclage des résidus de récolte entraîne des bilans négatifs en éléments nutritifs et ne permet pas d'entretenir la fertilité des sols à long terme. Stoorvogel et Smaling (1990) indiquent que cette agriculture prélevait environ 22 kg N , $6 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ et $18 \text{ kg K}_2\text{O}$ par hectare en 2000. Au Burkina Faso, le déficit en éléments nutritif était évalué à 14 kg N , $2 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ et $10 \text{ kg K}_2\text{O}$ par hectare. Caractérisée "d'agriculture minière" par la FAO, ce type d'agriculture a progressivement diminué l'offre en éléments nutritifs des sols (Bationo et *al.*, 1998^b), entraînant une baisse de la fertilité des sols et une diminution progressive des rendements des cultures (Bado et *al.*, 1997 a). Face à une telle situation, il devient urgent de développer des techniques de fertilisation accessibles aux producteurs et permettant d'augmenter la production par unité de surface tout en maintenant la fertilité des sols à long terme.

La zone soudanienne du Burkina Faso est dominée par les systèmes de culture à base de céréales. Les céréales sont cultivées généralement en association ou en rotation avec des légumineuses comme le niébé ou l'arachide. Le mil et le sorgho sont les deux principales céréales qui sont souvent accompagnées par le niébé.

Dans la zone guinéenne les systèmes de cultures sont relativement plus diversifiés. Le sorgho et le maïs sont les deux principales céréales. En plus du niébé, l'arachide est plus présente dans les systèmes de culture. Le cotonnier est la grande culture de rente dans cette zone. De plus, avec les revenus monétaires provenant du coton, on retrouve une relative intensification de la production agricole dans cette zone.

Dans les deux zones soudaniennes et guinéenne du Burkina Faso, l'azote est le premier facteur de croissance des végétaux. Bationo *et al* (1991^a) ont montré que l'azote et le phosphore sont les deux premiers facteurs limitant les rendements des cultures sur les sols des zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest. Hien (1990), Sédogo (1981) et Bado *et al.*(1997) indiquent que les teneurs en matière organiques et en azote influencent fortement la fertilité des sols et la productivité des cultures.

Pourtant, la présence des légumineuses dans les systèmes de culture est une opportunité pour améliorer la fertilité des sols et les rendements des cultures. Rappelons que 79.08% du volume en gaz N₂ de la biosphère se trouve dans l'atmosphère constituant ainsi la principale source d'azote (Haynes, 1986). Selon une image de Foth (1990), nous vivons dans «une mer» d'azote alors que cet élément demeure le principal facteur limitant la croissance des plantes.

Par leur capacité à fixer l'azote de l'atmosphère grâce au processus de la fixation symbiotique, les cultures légumineuses peuvent améliorer le bilan de l'azote dans les systèmes de cultures (Wani *et al.*, 1995 ; Chalk, 1993 ; Chalk, 1998). On peut assumer qu'un système de cultures utilisant une légumineuse fixatrice d'azote en rotation ou en association, aura probablement un meilleur bilan en azote et une meilleure productivité qu'une monoculture de céréales par exemple.

Malheureusement, très peu de travaux ont été consacrés aux rôles des légumineuses sur la fertilité des sols au Burkina Faso. Dans les zones agro-écologiques de l'Afrique de l'Ouest en général et au Burkina Faso en particulier, la plupart des recherches se sont très souvent limitées à démontrer les effets bénéfiques des rotations à base de légumineuse sur les rendements des cultures. Les quantités d'azote fixé par les légumineuses, leurs contributions en azote dans les systèmes de rotation et leurs impacts sur la nutrition azotée ont été très peu étudiés. Ces données sont pourtant très utiles pour développer des régies de fertilisation adaptées et permettant d'améliorer la productivité des systèmes de culture en valorisant le potentiel en azote des légumineuses.

L'azote fixé, et les contributions en azote des légumineuses peuvent être mesurés selon plusieurs méthodes. Les méthodes de la différence d'azote (Warembourg, 1993 ; Danso,

1995), les valeurs de remplacement en fertilisant azoté (Hesterman, *et al*, 1987) et les méthodes isotopiques utilisant l'isotope ^{15}N (Chamblee *et al.*, 1954 ; McAulife *et al.*, 1958 ; Danso, 1995 ; Vose *et Victoria*, 1986 ; Fried *et Middleboe*, 1977) sont les plus couramment utilisées.

Cependant, la quantité d'azote fixée par une légumineuse donne une idée globale de la capacité de la légumineuse à mobiliser l'azote de l'atmosphère. L'azote contenu dans les graines est totalement exporté et celui des fanes est partiellement exporté comme fourrage pour les animaux. L'azote fixé et l'azote total mobilisé par les légumineuses peuvent à la limite être des indicateurs pertinents si la biomasse des légumineuses est totalement recyclée dans le sol. Même quand elles ne sont pas exportées, les fanes des légumineuses sont consommées par les animaux transhumants en saison sèche. Seuls quelques résidus de racines et feuilles mortes sont recyclés dans le sol. Les méthodes d'évaluation de la fixation symbiotique de l'azote mesurent généralement l'azote fixé par la biomasse aérienne des légumineuses. L'azote des racines est plus difficile à mesurer. Dans un système de culture, l'azote total fixé par une légumineuses ne suffit pas et ne peut en elle seule expliquer la contribution en azote de cette légumineuse sur la fertilité azotée des sols.

Cette recherche est conduite selon les quatre hypothèses suivantes : i) l'azote fixé par les légumineuses contribue à enrichir le sol en azote ; ii) il augmente la nutrition azotée et les rendements des cultures succédant aux légumineuses ; iii) il influence l'utilisation de l'engrais azoté par les cultures succédant aux légumineuses ; iv) les légumineuses influencent à long terme les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols.

Afin de vérifier ces hypothèses, l'azote fixé par l'arachide et le niébé, l'enrichissement du sol en N minéral, l'absorption de l'azote, du P et les rendements du sorgho subséquent, le recouvrement de l'azote, les valeurs de remplacement en fertilisant azoté, les propriétés physico-chimiques du sol et la population des nématodes ont été étudiés.

Chapitre 1 : Revue de littérature

1.1 L'importance de l'azote dans la nutrition des plantes

L'azote est l'un des éléments nutritifs majeurs utilisés par les plantes. C'est le quatrième constituant des plantes qui est utilisé dans l'élaboration de molécules importantes comme les protéines, les nucléotides, les acides nucléiques et la chlorophylle (Epstein, 1972).

L'azote favorise l'utilisation des hydrates de carbone, stimule le développement et l'activité racinaire, favorisant ainsi l'absorption des autres éléments minéraux et la croissance des plantes (Stenvenson, 1986). Il est essentiel pour la synthèse des enzymes de la photosynthèse (Lamaze *et al.*, 1990).

Les plantes absorbent l'azote sous forme de nitrates (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+). L'importance relative de chacune de ces formes dépend de l'espèce végétale et des conditions du milieu (Layzell, 1990 ; Hageman 1984).

1.2 Les principales sources d'azote

1.2.1 Le sol

La première source d'azote utilisée par les plantes est l'azote du sol. En absence de tout apport d'engrais les plantes non fixatrices d'azote utilisent l'azote du sol durant leur cycle physiologique. Même les plantes fixatrices d'azote atmosphérique utilisent d'abord l'azote de la semence et du sol durant la première phase de la croissance. L'azote du sol est essentiellement sous forme organique. C'est par minéralisation que la matière organique du sol libère l'azote utilisable par les plantes.

En terme agronomique la matière organique renferme deux notions essentielles (Stevenson, 1994). La première notion fait référence aux produits organiques d'intérêt agronomique qui ne sont pas encore enfouis dans le sol. Il s'agit des résidus de récolte,

composts, fumiers, lisiers et autres, regroupés parfois sous le terme d'amendements ou engrais organiques.

La deuxième notion est plutôt agropédologique et fait référence à la matière organique comme partie intégrante du sol agricole. C'est toute la fraction non minérale incluant la macro et la micro faune du sol. Ce sont : la litière, la fraction légère, la biomasse microbienne, la macro faune, les produits organiques solubles à l'eau et la matière organique stabilisée ou humus. Le concept de pools de matière organique est utilisé pour différencier ces différentes fractions de la matière organique selon leur accessibilité à la décomposition microbienne. Ce concept tend à expliquer la dynamique de la matière organique et la façon dont la minéralisation des éléments nutritifs est influencée par les pratiques culturales. Une classification plus détaillée des fractions de la matière organique a été faite par Stevenson (1984). Il distingue 6 pools : la litière, la fraction légère, la biomasse microbienne, les produits organiques solubles à l'eau et la matière organique stabilisée ou humus.

La litière est constituée par les produits organiques laissés à la surface du sol. Elle est particulièrement remarquable sur les sols de forêt, les prairies et les jachères où elle joue un rôle important dans le recyclage des éléments nutritifs. Sur les sols cultivés les quantités de litières sont très faibles. Les résidus organiques sont généralement enfouis par les travaux de préparation des sols et la litière se trouve incorporée dans la fraction légère.

Les résidus organiques se décomposent à des rythmes variables selon leur nature et leur temps de séjour dans le sol. La fraction légère est constituée par l'ensemble des résidus organiques à différents stades de décomposition. Les molécules organiques de la fraction légère sont plus petites que celle de la fraction stable : l'humus. La fraction légère est le pool le plus dynamique avec un turnover rapide comparativement à l'humus qui est relativement plus stable. Dans son processus de décomposition elle libère des éléments nutritifs et constitue une importante source d'azote pour les plantes. Comparativement à l'humus, la taille de la fraction légère est faible. Elle représente environ 30% de l'humus et 2 à 17.5% de la matière organique du sol (Stevenson, 1984). La fraction légère est

utilisée comme indicateur de variation de la matière organique labile sous l'influence des pratiques culturales et des facteurs environnementaux affectant l'activité microbienne.

Par ordre d'importance numérique, la population microbienne ou biomasse microbienne du sol est constituée par les bactéries, les champignons, les algues, les protozoaires et les nématodes. Le pool de la biomasse microbienne contient 1 à 3% du carbone organique du sol (Feller, 1993). Avec un turnover plus rapide que celle de l'humus, les microorganismes jouent à la fois un rôle important dans la décomposition des résidus organiques et comme pool labile d'éléments nutritifs pour les plantes.

Le pool des produits organiques solubles comprend les substances organiques solubles à l'eau et contenues dans la solution du sol. Il constitue également une source d'azote pour les plantes.

L'humus stable est la fraction de la matière organique qui forme des liaisons plus stables avec la fraction minérale du sol. Les substances humiques se combinent avec les minéraux argileux du sol pour former des complexes argilo-humiques stables qui résistent à l'attaque des microorganismes du sol. C'est la fraction organique la plus stable. Elle constitue la majeure partie de la matière organique des sols agricoles et joue un rôle important dans l'équilibre du sol à long terme (Stevenson, 1984).

La grande majorité des sols d'Afrique de l'Ouest en général et ceux du Burkina Faso sont très particulièrement pauvres en matière organique avec des teneurs variant entre 1 et 8 mg C kg⁻¹ (Palo, 1993; Bationo et Buerkert, 2000) ayant comme conséquence une faible disponibilité en azote.

1.2.2 Les amendements organiques

Les résidus organiques laissés sur le sol après les récoltes constituent une litière temporaire. Dans les systèmes de culture traditionnelle d'Afrique de l'Ouest, environ 50% des résidus de récolte sont consommés par les animaux pendant la saison sèche (Powel et Saleen, 1987). Quand ils sont enfouis en début de saison, ces résidus enrichissent la

fraction légère de la matière organique du sol. Les amendements organiques incorporés aux sols sous forme de fumier ou de compost viennent également enrichir la fraction légère et constituent une source d'azote et d'humus.

Sous climat tropical semi-aride chaud la minéralisation de la matière organique est rapide. Les résidus de récolte, les composts, les fumiers de ferme, les jachères naturelles sont des sources de matière organique de qualité différentes. Chaque type d'amendements organiques influe selon sa nature sur la fourniture de l'azote et sur les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol. La qualité des amendements organiques et leur capacité à fournir l'azote sont généralement évaluées par le rapport C/N (Stevenson, 1984). Les amendements organiques à C/N inférieur à 20 se décomposent plus vite, l'azote se minéralise rapidement et sont considérés comme étant de meilleure qualité. À l'inverse les amendements organiques à C/N supérieur à 60 se décomposent moins vite et sont considérés comme étant de mauvaise qualité. Incorporés au sol, les amendements organiques à C/N élevé stimulent l'activité microbienne. Les microorganismes immobilisent temporairement l'azote, entraînant une "faim d'azote" pour la culture (Coleman, 1989). Les résidus à C/N compris entre 20 et 60 sont de qualité intermédiaire. Ils se minéralisent moins vite mais n'entraînent pas une immobilisation de l'azote. La minéralisation de l'azote des matières organiques a été décrite par plusieurs modèles d'équation permettant de calculer les taux de libération des formes assimilables de l'azote et les quantités de substrat minéralisé (Ellert et Bettany 1988 ; Simard et N'Dayegamiye, 1993).

1.2.3 Les engrais minéraux

L'azote du sol et des amendements organiques ne suffisent pas pour atteindre des rendements optimums. Des engrais minéraux azotés sont utilisés comme complément d'azote pour augmenter les rendements et intensifier la production végétale.

L'utilisation des engrais minéraux est relativement faible en Afrique de l'Ouest. Comparativement aux pays développés et aux autres pays en voie de développement où

les doses annuelles d'engrais minéraux appliqués peuvent atteindre 500 kg ha⁻¹, l'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne utilise moins de 10 kg ha⁻¹ d'engrais minéraux (Van Reuler et Prins, 1993). Environ 80% des engrais utilisés en Afrique subsaharienne sont importés (Van Reuler et Prins, 1993) et la principale cause de cette faible utilisation des engrais est leurs coûts relativement élevés comparativement aux faibles revenus des producteurs.

1.2.4 Les plantes fixatrices d'azote

La plus grande partie de l'azote de la biosphère (79%) se trouve dans l'atmosphère (Haynes, 1986; Foth, 1990). Mais, seul un nombre réduit de genres bactériens vivant librement ou en symbiose avec les plantes sont capables de réduire l'azote moléculaire de l'atmosphère. Par la symbiose entre les bactéries réductrices de l'azote atmosphérique, une grande partie des légumineuses utilisent principalement l'azote provenant de l'atmosphère. Dans une revue de littérature, Peoples et al. (1995) donnent le potentiel de fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses. Les légumineuses tropicales comme niébé (*Vigna unguiculata*), l'arachide (*Arachis hypogaea*) et le soja (*Glycine max*) peuvent fixer respectivement 32 à 89, 22 à 92 et 0-95% de leur besoins en azote dans l'atmosphère. Comme on le constate, les quantités d'azote fixé sont très variables d'une espèce à l'autre et pour une même espèce car l'activité symbiotique est influencée par les souches bactériennes, l'espèce végétale et les facteurs du milieu (Wani et al., 1995).

1.2.4.1 La fixation symbiotique de l'azote

La fixation de l'azote atmosphérique (N₂) se fait par plusieurs mécanismes dont le plus important et le plus connu est la fixation biologique par des micro-organismes libres ou vivant en symbiose avec certaines plantes comme les légumineuses (Haynes, 1986 ; Stevenson, 1984).

Les bactéries de la famille des *rhizobiacées* en général, et celles du genre *Rhizobium* peuvent infecter les racines des légumineuses entraînant la formation de nodules appelés nodosités. Par ces nodules, la plante hôte (la légumineuse) offre un micro habitat exceptionnellement favorable à la bactérie tout en lui procurant des substrats carbonés provenant de la photosynthèse. En retour, la bactérie fixe l'azote atmosphérique (N_2) et le fournit à la plante hôte sous forme assimilable NH_3 (Dommergues et al., 1999). Cette association à bénéfice réciproque entre la légumineuse et les bactéries est appelée symbiose permettant une fixation symbiotique de l'azote de l'atmosphère.

Le processus de la fixation consiste en la réduction de l'azote atmosphérique N_2 sous forme ammoniacale selon la réaction suivante (Dommergues et al., 1999).



Cette réaction de fixation de N_2 est catalysée par un complexe enzymatique appelée nitrogénase (Dixon et Wheeler, 1986).

De nombreuses légumineuses tropicales comme l'arachide et le niébé nodulent librement et établissent une symbiose efficace avec des rhizobia natifs du sol (Dart et Krantz, 1977). La capacité de fixation symbiotique de l'azote des légumineuses peut être améliorée en inoculant le sol avec des souches performantes de rhizobia. Des techniques de sélection ont permis de mettre sur le marché de nombreuses souches utilisables pour améliorer la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses. Cependant l'efficacité des souches importées sur les légumineuses tropicales est très contestée (Dakora, 1985). Certaines souches semblent très efficaces alors que de nombreuses souches importées se sont montrées moins efficaces que les souches locales. L'inefficacité des souches importées sur les légumineuses tropicales a été diversement expliquée (Dakora, 1985). Les souches introduites résistent difficilement à la compétition entre microorganismes dans

l'environnement des sols tropicaux. Elles sont plus facilement détruites par les microorganismes parasites. Les souches introduites doivent supporter une compétition avec les souches locales pour occuper les sites de nodulation sur les racines des légumineuses. Plus adaptées à leur environnement, les souches locales occupent plus facilement les sites de nodulation comparativement aux souches introduites qui doivent supporter en plus la pression parasitaire. Les souches locales semblent plus adaptées aux conditions des sols tropicaux pauvres en éléments nutritifs où s'effectue la symbiose Légumineuse/Rhizobium, alors que les souches importées peuvent avoir des difficultés pour exprimer leur potentiel de fixation de l'azote. Dakora (1985) rapporte que les apports d'éléments minéraux autres que l'azote accroissent les performances de la symbiose Arachide/Rhizobium. Andrew (1977) a montré que les apports complémentaires d'éléments nutritifs comme le phosphore, le calcium et le soufre étaient plus efficaces sur la fixation symbiotique de l'azote que sur la croissance de la légumineuse hôte. Ces résultats montrent que la pauvreté des sols tropicaux en éléments nutritifs est un des facteurs limitant l'expression du potentiel de fixation des souches de rhizobia en général et des souches importées qui sont probablement plus exigeantes.

1.2.4.2 Évaluation des contributions en azote des légumineuses

Les légumineuses fixatrices d'azote utilisent deux sources d'azote quand on n'applique pas de l'engrais azoté : l'azote provenant du sol et de l'atmosphère. Elles utilisent trois sources d'azote quand on applique de l'engrais azoté : le sol, l'atmosphère et l'engrais. Distinguer la contribution de chaque source d'azote dans le rendement de la légumineuse est possible en quantifiant l'azote provenant de chaque source.

L'azote fixé dans l'atmosphère est quantifiable par plusieurs méthodes. Plusieurs revues de littératures sur les principales méthodes ont été faites par différents auteurs (Peoples et Herridge, 1990 ; Hardarson et Danso, 1993 ; Peoples et al, 1995). Les méthodes les plus couramment utilisées pour mesurer la fixation symbiotique de l'azote sont : la méthode par différence d'azote total, la valeur de remplacement en fertilisant azoté (VRFA), la

réduction de l'acétylène, l'abondance naturelle en ^{15}N , l'atmosphère enrichie en $^{15}\text{N}_2$, la valeur 'A' et la dilution isotopique

La méthode de la différence d'azote total et la valeur de remplacement en fertilisant azoté sont les plus simples et moins coûteuses. Les méthodes isotopiques utilisant l'isotope ^{15}N de l'azote sont plus coûteuses et généralement plus précises (Hardarson et Danso, 1993).

Le principe de la dilution isotopique est appliqué par analogie pour mesurer l'azote fixé par les légumineuses dans l'atmosphère (Menzel et Smith, 1984). Comme toutes les plantes, les légumineuses fixatrices d'azote ont une certaine teneur ou excès isotopique naturel en ^{15}N . Elles fixent l'azote atmosphérique qui est principalement sous forme d'azote ^{14}N . Il y a donc un effet de dilution de l'excès isotopique en ^{15}N de la plante à mesure qu'elle mobilise du ^{14}N dans l'atmosphère. Par les variations d'excès atomiques on peut mesurer la quantité d'azote atmosphérique fixé par la plante (Chamblee et al., 1954; McAuliffe et al., 1958; Fried et Middleboe, 1977; Vose et Victoria, 1986; Danso, 1995).

Des plus simples aux plus sophistiquées, chaque méthode à ses forces et ses faiblesses et le choix d'une méthode dépend surtout des ressources disponibles, des conditions expérimentales et du niveau de précision recherchée.

A) Méthode de la différence d'azote

C'est la méthode la plus simple et la plus ancienne dont le principe consiste à mesurer l'azote fixé par la différence entre l'azote total d'une plante fixatrice et celui d'une plante non fixatrice d'azote utilisée comme de référence ou plante teste (Warembourg, 1993 ; Danso, 1995). Cette méthode postule que si une plante fixatrice d'azote atmosphérique et une plante non fixatrice sont cultivées dans les mêmes conditions sur un même milieu, la quantité d'azote accumulé par la plante fixatrice sera supérieure à celle mobilisée par la plante non fixatrice. On peut alors calculer déduire (par différence), la quantité d'azote fixé par la plante fixatrice et provenant de l'atmosphère.

La méthode utilise un postulat très contestable, en admettant au départ que les plantes (fixatrice et non fixatrice) ont les mêmes besoins en azote. L'hypothèse simpliste de l'égalité des besoins en N des plantes constitue la faiblesse majeure de cette méthode (Danso, 1995).

De nombreux travaux ont montré que cette vieille méthode donnait quelques fois des résultats comparables à ceux obtenus avec les nouvelles méthodes plus performantes (Gauthier *et al.*, 1985 ; Ankomah, 1995) ; et que la fiabilité des résultats peut être améliorée en choisissant judicieusement la plante non fixatrice de référence et en multipliant les mesures pour une meilleure estimation de l'azote fixé (Warembourg, 1993).

B) La valeur de remplacement en fertilisant azoté

La méthode de la valeur de remplacement en fertilisant azoté (V.R.F.A.) ou équivalent azote mesure le surplus de rendement dû au précédent légumineuse pour l'exprimer en quantité d'engrais azoté nécessaire pour atteindre le même niveau de rendement. Le concept de la VRFA postule que lorsqu'une culture non fixatrice succède à une légumineuse dont la biomasse a été enfouie, la VRFA de cette légumineuse est la quantité d'engrais azoté nécessaire pour obtenir le même rendement quand la culture non fixatrice n'est pas précédée par une légumineuse (Hesterman, 1986 ; Peoples et Herridge, 1990 ; M'Vondo Awono, 1997). La VRFA est aussi appelée 'effet résiduel en azote' ou 'équivalent azote' des légumineuses (Hesterman *et al.*, 1987).

C) Méthode de la réduction de l'acétylène

Comme son nom l'indique, cette méthode est basée sur le principe de la réduction de l'acétylène en éthylène pour mesurer l'azote de la fixation symbiotique. Le processus de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique résulte de la capacité de la nitrogénase, enzyme impliquée dans la fixation de l'azote atmosphérique à réduire le N_2 en NH_4 . La nitrogénase est aussi capable de réduire de l'acétylène (C_2H_2) en éthylène (C_2H_4). Le principe de cette méthode consiste à récupérer et à mesurer l'éthylène résultant de la

réduction de l'acétylène par la nitrogénase pour évaluer la quantité d'azote fixé (Warembourg, 1993 ; Rennie et Rennie, 1983 ; Danso, 1995). La procédure expérimentale consiste à récupérer les nodules avec ou sans les racines, ou toute la plante et à les mettre en incubation dans un milieu contenant de l'acétylène pendant une période de temps variant de quelques minutes à plusieurs heures. L'éthylène produit au bout d'un certain temps est mesuré par chromatographie en phase gazeuse. La quantité d'éthylène produite peut servir directement comme mesure de l'activité de la nitrogénase ou de l'activité fixatrice d'azote. L'éthylène est converti en quantité d'azote fixé en utilisant un facteur de conversion calculé à partir des réactions chimiques (Hardarson et Danso, 1993 ; Danso, 1995).

La méthode a un certain nombre d'avantages. C'est une méthode légère, peu coûteuse et très sensible (Rennie et Rennie, 1983; Warembourg, 1993 ; Hardarson et Danso, 1993 ; Danso, 1995). Elle a cependant certains handicaps. Le facteur de conversion utilisé pour convertir la quantité d'acétylène en quantité d'azote fixé est très critiqué. Ce facteur est variable avec la culture et les conditions environnementales (Rennie et Rennie, 1983). La méthode n'est pas adaptée pour des études au champ car elle mesure l'N fixé pendant un court moment d'incubation pour extrapoler sur le cycle de la plante. Pourtant, l'activité fixatrice de l'N n'est pas constante. Elle est par exemple plus importante pendant le jour et elle varie les saisons (Warembourg, 1993, Danso, 1995). L'extraction des racines et des nodules est une opération difficile qui affecte les résultats. Il est souvent difficile d'extraire la totalité des racines et des nodules et toutes ces contraintes limitent l'utilisation au champ de cette méthode.

D) L'abondance naturelle en ^{15}N

Comme son nom l'indique, cette méthode utilise l'abondance naturelle en ^{15}N du sol et de l'atmosphère pour quantifier la fixation de l'azote atmosphérique par les plantes. L'atmosphère a une abondance naturelle en ^{15}N de 0,3663% (Hardarson et Danso, 1993). Les sols ont généralement une abondance naturelle en ^{15}N plus élevée que l'atmosphère. À cause de cette différence d'abondance naturelle entre le sol et l'atmosphère, les plantes

fixatrices d'azote ont une abondance en ^{15}N moins élevée que les plantes non fixatrices. Cette différence d'abondance atomique entre plantes fixatrices et non fixatrices est utilisée pour mesurer la fixation symbiotique de l'azote (Hardarson et Danso, 1993). Cette méthode a une contrainte majeure. En réalité les différences d'abondance naturelle en ^{15}N des sols et de l'atmosphère sont très faibles et difficilement mesurables. Il faut des instruments sophistiqués et beaucoup de précautions, ce qui limite son utilisation (Danso, 1995).

E) Méthode à l'atmosphère enrichie en ^{15}N

La méthode à l'atmosphère enrichie en ^{15}N consiste à placer la plante fixatrice d'azote dans un micro environnement enrichi en azote atmosphérique marqué (^{15}N) et à mesurer au bout d'un certain temps l'excès atomique en ^{15}N dans la plante pour calculer l'azote fixé (Vose *et al.*, 1981). Cette méthode exige l'utilisation de ^{15}N ayant un excès atomique élevé pour contrôler l'effet de dilution. L'azote marqué doit avoir environ 30 à 40% d'excès isotopique (Vose *et al.*, 1981). C'est une méthode de mesure directe mais ayant des limites d'ordre pratique. On ne peut travailler qu'avec un nombre limité de plantes pendant une période de temps très limitée. Les plantes doivent être isoler dans une atmosphère enrichie en ^{15}N et il n'est pas réaliste de concevoir de tels dispositifs pour des mesures au champ. Elle est surtout utilisée pour les études au laboratoire (Rennie et Rennie, 1983 ; Danso,1995).

F) Méthode de la valeur 'A'

Le concept de la valeur "A" a été développé par Fried et Dean (1952). À l'origine, le concept de la valeur "A" était basé sur l'utilisation de la technique de la dilution isotopique pour mesurer la disponibilité des éléments nutritifs, ou la capacité du sol à fournir ces éléments nutritifs aux plantes.

Par la suite, la valeur ‘‘A’’ a été appliquée par analogie pour mesurer la fixation symbiotique de l’azote en considérant l’atmosphère comme une troisième source d’azote pour les plantes fixatrices d’azote. La procédure expérimentale consiste à mesurer les valeurs ‘‘A’’ du sol avec une plante non fixatrice d’azote (A_1) et une plante fixatrice d’azote (A_2) et à déduire par différence (A_2-A_1), la quantité d’azote provenant de la fixation symbiotique (Fried et Broeshart, 1975).

Cette méthode a les avantages suivants : on peut appliquer des doses différentes d’engrais azoté sur les plantes (fixatrices et non fixatrice), et utiliser des espèces végétales ayant des besoins différents en azote et leur appliquer des doses adaptées à chaque espèce sans modifier le mode de calcul (Rennie et Rennie, 1983). Cependant, la dose d’azote appliqué sur la plante fixatrice doit demeurer faible pour ne pas affecter l’activité fixatrice de la plante test (Fried et Broeshart, 1975).

Malgré ces avantages, l’utilisation de la méthode de la valeur ‘A’ pour mesurer la fixation symbiotique de l’azote fait l’objet de quelques critiques. On lui reproche souvent la complexité dans les équations mathématiques car on mesure en réalité l’azote fixé en équivalant engrais pour l’exprimer par la suite en azote en tenant du coefficient d’utilisation de l’engrais utilisé (Danso,1995). Elle est dépendante de la biomasse produite ou des rendements de la culture. Elle ne peut donc avoir une meilleure précision que les méthodes isotopiques directes (Rennie et Rennie, 1983; Vose et Victoria, 1986).

G) Méthode de la dilution isotopique

Contrairement à la méthode de la valeur ‘‘A’’ qui utilise une procédure indirecte pour mesurer l’azote fixé, on peut mesurer la fixation symbiotique de l’azote par une méthode isotopique directe sans passer par la détermination des valeurs ‘A’ en utilisant les rapports des proportions d’excès atomique en ^{15}N des deux plantes selon l’équation (2) (Fried et Middleboe, 1977).

$$\text{N-fixé (kg ha}^{-1}\text{)} = \left(1 - \frac{\% \text{ excès } ^{15}\text{N plante fixatrice}}{\% \text{ excès } ^{15}\text{N plante non fixatrice}}\right) \times \text{N-total (kg ha}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

Cette méthode a beaucoup d'avantages (Donald et al., 1986 ; Phillips et al. 1986 ; Danso, 1995). Très pratique pour les mesures au champ, elle donne une estimation de la fixation symbiotique de l'azote sur toute la saison de culture Elle est aussi bien applicable en serre ou directement au champ. Elle permet de quantifier à la fois les trois sources d'azote (N de l'engrais, du sol et de la fixation symbiotique). Elle donne d'autres informations d'intérêt agronomique comme l'efficacité d'utilisation de l'engrais par la légumineuse fixatrice d'azote et la plante témoin non fixatrice.

Elle présente surtout des contraintes exigeant certaines précautions dans son utilisation. Dans l'expérimentation agronomique, il faut assurer un égal accès des plantes (fixatrices et non fixatrices) à l'engrais azoté contenant le ^{15}N (Vose et Victoria, 1986 ; Danso *et al.*, 1993) et l'application du ^{15}N sous forme liquide est très conseillée (Vose et Victoria, 1986).

Cependant, toutes les méthodes isotopiques ont un inconvénient majeur. Il faut appliquer de l'engrais azoté sur la plante fixatrice pour mesurer l'azote provenant de l'atmosphère. L'azote apporté par l'engrais peut influencer l'activité symbiotique (Dixon et Wheeler, 1986) et il est recommandé d'utiliser de faibles doses d'azote en privilégiant l'usage des engrais très enrichis en ^{15}N (Kucey, 1989).

1.2.4.3 Importance des légumineuses dans les systèmes de culture

Dans les systèmes de culture utilisant les rotations, l'azote fixé par les légumineuses peut être utilisé d'abord par les légumineuses, puis par les cultures suivantes. Utilisées en rotation ou en association dans les systèmes de culture, les légumineuses apportent une

certaine contribution en azote en fixant et en intégrant une partie de l'azote atmosphérique dans le système. Les résidus des légumineuses sont plus riches en azote et contribuent à enrichir le sol en cet élément (LaRue et Patterson, 1981). Les cultures succédant aux légumineuses peuvent bénéficier indirectement de l'azote fixé par l'entremise des résidus laissés par la légumineuse (Chalk, 1998).

Selon Danso (1995), l'azote de la fixation symbiotique a une contribution plus importante pour la croissance des plantes comparativement aux engrais azotés appliqués dans l'agriculture des pays en développement. L'azote fixé dans l'atmosphère contribue pour 50 à 60 % du N des légumineuses à graines, 55 à 60 % du N des arbres fixateurs d'azote, 70 à 80 % du N des légumineuses fourragères (Danso, 1995).

Il est bien établi que les précédents légumineuses augmentent généralement les rendements des cultures non fixatrices d'azote mais cet apport d'azote atmosphérique n'explique pas toujours les rendements souvent très élevés des cultures succédant aux légumineuses (Chalk, 1993 ; Bationo et Ntare, 2000). D'autres effets bénéfiques des légumineuses semblent intervenir dans l'accroissement des rendements et certains auteurs comme Chalk(1993 ; 1998) préfèrent le terme "effet rotation" pour désigner cet effet positif des légumineuse sur la culture suivante.

Certains auteurs attribuent l'effet bénéfique des rotations à l'amélioration des propriétés physiques et biologiques des sols (Hoshikawa, 1990) et à la capacité de quelques légumineuses à solubiliser des phosphates de calcium et le phosphore occlu par leurs exsudats racinaires (Nagarajah et al, 1970; Arihara et Ohwaki, 1989 ; Gardener et al, 1981 ; Subbarao et al, 1997).

1.3 Le recouvrement de l'azote

L'azote est l'élément majeur le plus mobile et la gestion des engrais azotés entraîne des pertes importantes d'azote. Une partie de l'azote du sol et des engrais peu être perdue sous forme gazeuse par volatilisation de NH_3 par nitrification, dénitrification bactérienne, réaction entre NO_2^- et différents constituants du sol ou par restitution de N_2 à

l'atmosphère (Haynes et Sherlock, 1986). La dénitrification biologique est un processus de respiration bactérienne au cours duquel des oxydes d'azote, principalement NO_3^- et NO_2^- , sont réduits de façon séquentielle en NO , N_2O et N_2 (Mvondo Awono, 1997). Comme les produits de la réduction de NO_3^- ne sont pas assimilés par les micro-organismes, mais rejetés dans l'atmosphère, la dénitrification biologique est aussi appelée dénitrification dissimilatoire (Haynes, 1986).

Les ions nitrates en solution et peu retenus par les colloïdes du sol peuvent être facilement perdus par lessivage. La migration des nitrates est influencée par les caractéristiques du sol, le climat et les techniques culturales (Mvondo Awono, 1997). En Afrique subsaharienne, les pertes d'azote semblent liées surtout à la volatilisation de l'ammoniaque. Christianson et Vleck (1991) ont observé d'importantes pertes d'azote par volatilisation, allant de 24 à 47% lorsque l'engrais azoté est appliqué sous forme d'urée.

Les pertes d'azote dépendent également de la nature et de la quantité des engrais appliqués et de la capacité de la culture à utiliser l'azote apporté par ces engrais. Les concepts de recouvrement de l'azote, de coefficient apparent d'utilisation (CAU) ou de coefficient réel d'utilisation de l'azote (CRU) ont été développés pour mesurer les capacités des cultures à utiliser l'azote apporté par les engrais (Tran, 1994; Tran *et al.*, 1996).

Le CAU correspond au pourcentage d'azote prélevé par la plante par rapport à la quantité d'azote appliqué. C'est un coefficient apparent car il ne prend pas en compte l'influence de l'azote provenant du sol. Le CRU est une évaluation plus réelle des quantités d'azote par la plante et qui provient de l'engrais. Le CRU de l'azote est mesuré en utilisant la technique de la dilution isotopique avec le ^{15}N . Par le marquage isotopique de l'engrais azoté, les proportions et les quantités d'azote prélevé par la plante et provenant de l'engrais sont déterminées (Christianson et Vleck, 1991; Tran *et al.*, 1996).

Comme source d'azote, les engrais et amendements organiques influencent l'utilisation de l'azote par les cultures. La quantité, la qualité et la richesse en azote des résidus de récolte dépendent du type de culture. Ces résidus organiques peuvent influencer le recouvrement de l'engrais azoté. Singh et Jones (1976) ont par exemple observé que les pertes en nitrates

étaient plus élevées dans les monocultures par rapport aux systèmes utilisant les rotations culturales, diminuant ainsi le coefficient d'utilisation de l'engrais azoté.

Dans les systèmes de cultures, les légumineuses fixent de l'azote dans l'atmosphère et le recycle en partie dans le sol par leurs résidus. En enrichissant le sol en azote organique elles augmentent l'azote minéralisable qui peut influencer le recouvrement de l'azote apporté par les engrais minéraux. L'impact des légumineuses peut être évalué en suivant l'évolution de l'azote minéral du sol, l'azote total absorbé et l'utilisation de l'engrais azoté par les cultures succédant aux légumineuses.

Chapitre 2 : Sites d'étude, matériel et méthodes

2.1 Les sites d'étude

Les travaux de recherche ont été effectués au Burkina Faso sur deux sites, correspondant à deux zones agro-écologiques. Sur les deux sites, les expérimentations agronomiques ont été réalisées sur les stations de recherche agronomiques de l'Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole du Burkina Faso (INERA).

Sur les deux sites, les expérimentations ont été installées sur des sols ferrugineux tropicaux lessivés. Les sols étaient en jachère depuis au moins sept années avant l'installation des expérimentations. Les principales caractéristiques physico-chimiques des sols des champs d'expérimentation sont présentées sur le Tableau 1 (page 25). Les sols des deux sites sont pauvres en argile et en matière organique, ce qui explique leur faible capacité d'échange cationique (CEC). Ce sont des sols très sableux à texture sablo-limoneuse, légèrement acide et pauvres en azote et en phosphore. Cependant, les deux sites ont quelques caractéristiques spécifiques relatives à leur zone écologique

2.1.1 Le site de Farako-Bâ

Il est localisé dans la région Ouest du Burkina Faso en zone guinéenne. La station de recherche agronomique de Farakô-Ba est à une longitude de 4° 20' Ouest, une latitude de 11° 6' Nord et à une altitude de 405 m. Cette zone écologique a une seule saison de pluie. La saison de culture commence généralement en début juin et se termine en septembre. Il y a quelques fois un décalage de la saison des pluies durant certaines années mais la zone enregistre en moyenne quatre mois de pluies dans l'année. Durant la période d'expérimentation, la pluviométrie annuelle a varié entre 776 mm (année 2001) à 1212 mm (1998). Le nombre de jours de pluies par année a varié entre 65 jours (année 2001) et 90 jours (1999) (Figure 1, page 26).

2.1.2 Le site de Kouaré

Il est localisé dans la région Est en zone soudanienne. La station de recherche agronomique de Kouaré est à une latitude de 11° 59' Nord et une longitude de 0° 19' Est avec une altitude de 850 m. La pluviométrie moyenne annuelle est de 800 mm environ. La saison des pluies commence généralement en début mi-juin et se termine en septembre. Comme à Farako-Bâ, la saison des pluies est parfois décalée d'une année à l'autre, mais la zone enregistre en moyenne trois mois de pluies dans l'année. Durant la période d'expérimentation, la pluviométrie annuelle a varié entre 1076 mm en 1998 et 741 mm (en 2000). Le nombre de jours de pluies par année a varié entre 44 jours (1995) et 76 jours (1999) (Figure 2, page 27).

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques des sols de Farakô-Ba et Kouaré

	Farako-Bâ	Kouaré
Argile (%)	7	11
Sable (%)	74	75
Limon (%)	19	14
pH eau	6.5	6.1
pH KCl	5.6	5.5
Carbone total (%)	0.61	0.35
Matière organique totale (%)	1.1	0.8
C/N	13.7	10.7
N total (mg kg-1)	409	317
P Bray I (mg kg-1)	5.6	5.5
P total (mg kg-1)	69.8	72.0
K total (mg kg-1)	531	371
Ca échangeable(Cmol ⁺ Kg ⁻¹ Sol)	1.08	1.59
K échangeable(Cmol ⁺ Kg ⁻¹ Sol)	0.02	0.13
Mg échangeable(Cmol ⁺ Kg ⁻¹ Sol)	0.46	0.51
ECEC(Cmol ⁺ Kg ⁻¹ Sol)	1.82	2.30
Acidité d'échange(Cmol ⁺ Kg ⁻¹ Sol)	0.08	0.02
Saturation en bases(%)	96	99

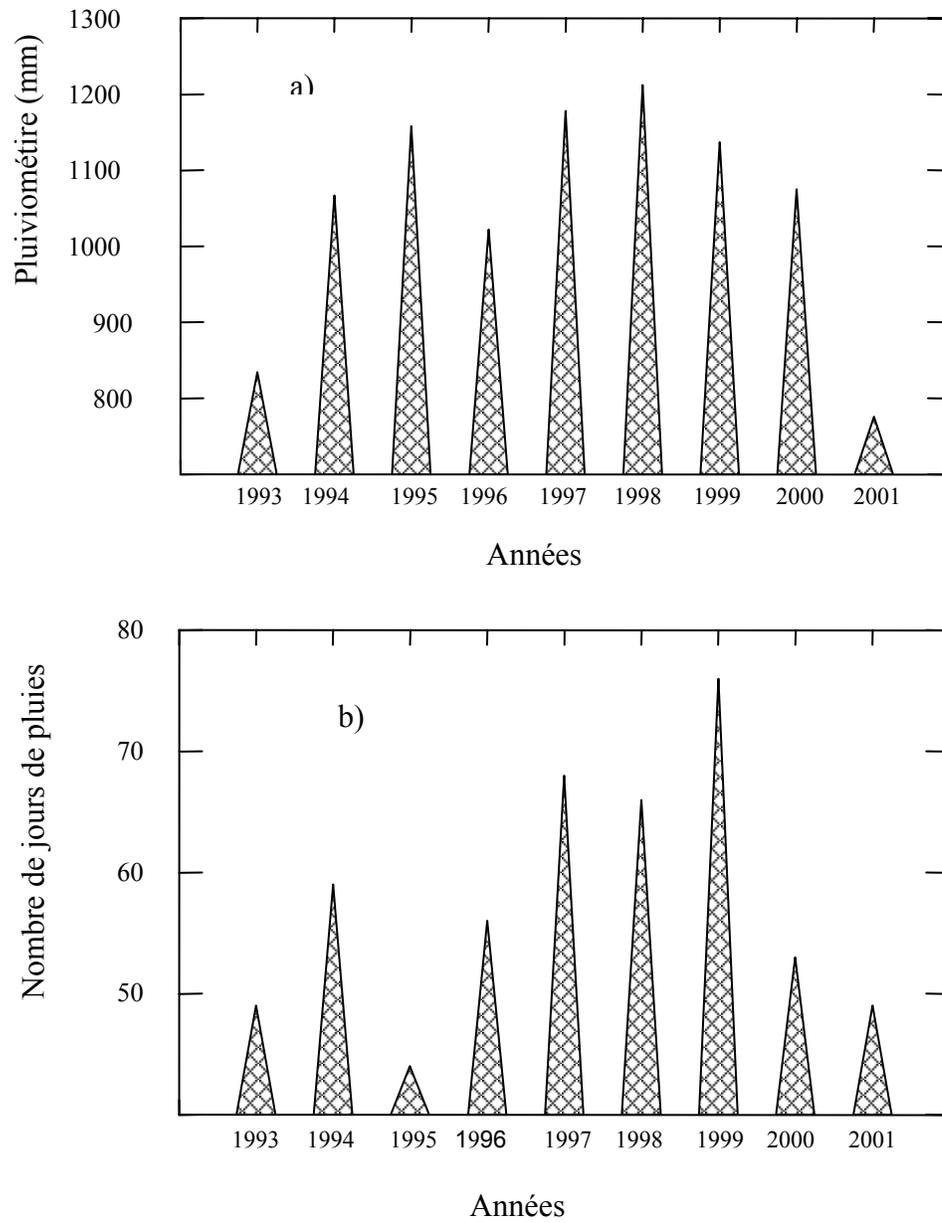


Figure 1 : Pluviométrie annuelle(a) et nombre de jours de pluies (b) du site de Farakô-Ba de 1993 à 2001

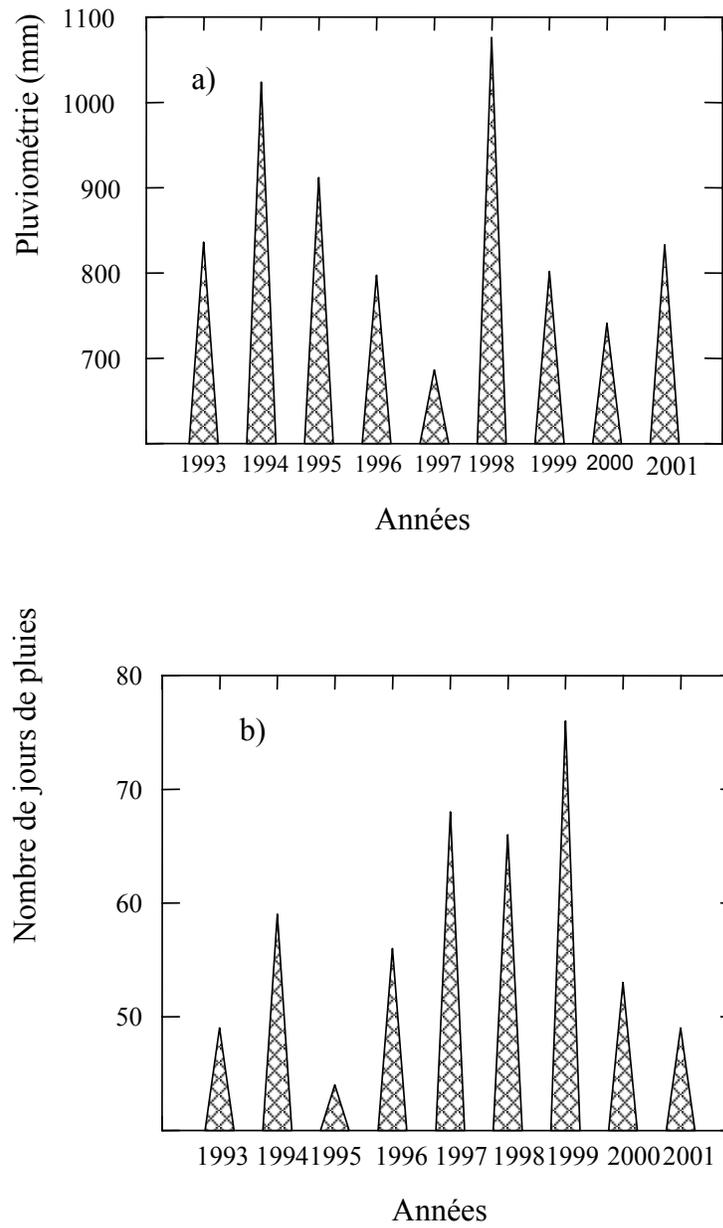


Figure 2 : Pluviométrie annuelle(a) et nombre de jours de pluies (b) du site de Kouaré de 1994 à 2001.

2.2 Matériel d'étude

2.2.1 Matériel végétal

La fixation symbiotique de l'azote, l'impact des légumineuses sur l'azote et les paramètres de la fertilité des sols, les nématodes et les rendements des cultures succédant aux légumineuses ont été étudiés par différentes séries de rotations culturales. Nous avons utilisé des expérimentations agronomiques au champ sur les sites de Farakô-Ba et Kouaré. Sur chaque site, nous avons utilisé les cultures couramment pratiquées par les producteurs dans la région.

Le sorgho (*Sorghum bicolor*) est la principale culture céréalière du Burkina Faso. En plus du sorgho, le cotonnier (*Gossypium spp*) est la principale culture de rente de la zone guinéenne. Premier produit d'exportation, le coton occupe une place importante dans l'économie du pays. Dans cette zone qui a des conditions climatiques plus favorables à l'agriculture, l'arachide (*Arachis hypogaea*) et le niébé (*Vigna unguiculata*) sont les deux principales cultures légumineuses couramment utilisées par les producteurs. Dans la zone soudanienne semi-aride moins favorable à l'agriculture, c'est le niébé qui est la légumineuse la plus couramment utilisée dans les systèmes de culture.

Sur le site de Farakô-Ba, les séries de rotations ont été conçues en utilisant les quatre cultures de la zone guinéenne : sorgho, cotonnier, arachide et niébé. En plus des quatre cultures, nous avons utilisé une variété de niébé non fixateur d'azote comme plante de référence (ou plante témoin) pour étudier la fixation symbiotique de l'azote par l'arachide et le niébé (Pemberton, 1990). Sur le site de Kouaré, nous avons utilisé seulement le niébé et le sorgho.

Nous avons utilisé les variétés améliorées recommandées aux producteurs. La liste des cultures par site et les variétés utilisées sont présentées dans le Tableau 2 (page 29).

Tableau 2 : Liste des cultures et des variétés utilisées par site

Sites	Cultures et Noms botaniques	Variétés
Farako-Bâ	Cotonnier: <i>Gossypium spp</i>	FK 290
	Sorgho: <i>Sorghum bicolor</i>	Gnofing
	Arachide: <i>Arachis hypogaea</i>	RMP 91
	Niébé fixateur : <i>Vigna unguiculata (L.) Walp.</i>	KVX-61-1
	Niébé non fixateur : <i>Vigna unguiculata(L.) Walp</i>	IC-1
Kouaré	Sorgho: <i>Sorghum bicolor</i>	ICSV-1049
	Niébé fixateur : <i>Vigna unguiculata (L.) Walp</i>	KVX-61-1

2.2.2 Engrais et amendements

Nous avons utilisé les mêmes types d'engrais minéraux sur les deux sites. L'engrais complexe dosant 14-23-14-6-1 d'élément N-P-K-S-B respectivement et l'urée sont les deux principaux types d'engrais recommandés et disponibles sur le marché au Burkina Faso. Ils ont été utilisés avec ou sans amendement organiques ou minéraux dans les expérimentations.

Le phosphate naturel local appelé Burkinaphosphate ou phosphate de Kodjari (nom du site du gisement) et la dolomie locale ont été également utilisés. Le phosphate naturel a été utilisé comme source alternative de phosphore. La dolomie contenant 35 et 19% de CaO et MgO, a été utilisée annuellement à la dose de 1000 kg ha⁻¹ dans le but de neutraliser l'acidité du sol qui peut influencer les effets des légumineuses. Le phosphate super triple (20.1 % P) et le chlorure de potassium (47 % K) ont été utilisés pour compléter les doses d'éléments nutritifs selon les cultures.

L'engrais complexe NPKSB, le fumier, la dolomie, le super phosphate triple et le chlorure de potassium ont été appliqués au semis. L'urée ordinaire a été utilisée uniquement sur le

sorgho et le cotonnier en deuxième application (40 jours après le semis) pour compléter les doses d'azote recommandées pour ces cultures. Les doses d'éléments nutritifs apportés par les engrais minéraux en fonction des cultures sont présentées dans le Tableau 3 (page 30).

Tableau 3 : Doses d'éléments nutritifs apportés par les engrais minéraux selon les cultures

Culture	Éléments nutritifs (kg ha ⁻¹)				
	N	P	K	S	B
Sorgho	37	10	11	6	1
Cotonnier	44	15	17	9	1.5
Niébé	14	10	11	6	1
Arachide	14	10	11	6	1

Les fumiers provenant des étables des stations de recherche de Farakô-Ba et Kouaré ont été utilisés comme amendement organiques dans les traitements. Ce sont des fumiers de bovins qui sont collectés périodiquement pour les expérimentations agronomiques. Les composts ont été produits sur les deux stations de recherche à partir des tiges de sorgho. Les caractéristiques chimiques des amendements organiques, du fumier et du compost sont présentées sur le Tableau 4 (page, 30). Le Tableau 5 (page, 31) présente les caractéristiques chimiques des phosphates naturels et de la dolomie.

Tableau 4 : Compositions chimiques moyennes du fumier et du compost utilisés

	Fumier	Compost
Azote (%N)	1.80	1.11
Carbone (%C)	18.40	12.80
C/N	10	12
Phosphore (%P)	0.31	0.36
Potassium (%K)	0.16	1.20

Tableau 5 : Composition chimique de la dolomie et du phosphate naturel

*Phosphate naturel (Teneurs en %)			
P ₂ O ₅	25.5	Al soluble HCl	3.1
K ₂ O	0.23	Fe ₂ O ₃ soluble HCl	3.4
CaO	34.5	F	2.5
MgO	0.27	Na ₂ O	0.11
SiO ₂	26.24	S	0.04
CO ₂	1.0		
Dolomie			
CaO(%)	27	SiO ₂ (%)	17
MgO(%)	19	Perte au Feu(%)	34
Al ₂ O ₃ (%)	1	Granulométrie	0.001 mm
Fe ₂ O ₃ (%)	1		

* McClellan et Notholt (1985)

2.3 Méthodes d'étude

2.3.1 Effets des légumineuses sur l'azote et le sorgho subséquent

Dans cette partie de l'étude, nous avons mesuré les quantités d'azote fixé par l'arachide et le niébé, l'influence des précédents légumineuses sur les rendements du sorgho subséquent, l'azote minéral et les nématodes du sol. Elle a été réalisée par une expérimentation au champ à Farakô-Ba pendant deux années successives (2000 et 2001).

2.3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était un factoriel 7x6 disposé en parcelles subdivisées (split-plot) avec 4 répétitions. Sept rotations culturales ont été comparées comme premier facteur dans les parcelles principales. La liste des traitements et la succession des cultures sont présentées dans le Tableau 6, page 33.

Nous avons utilisé des parcelles principales de 17.5 m x 12.5 m, soit 218.75 m² chacune. Les traitements principaux (rotations) sont disposés au hasard dans chaque répétition. Chaque parcelle principale a été subdivisée en six sous parcelles de 4 m x 6 m, soit 24 m² et six formules de fumure (NPK recommandée, NPK+Dolomie, NPK+fumier, NK+Phosphate naturel, PK et Témoin sans engrais) ont été appliquées dans les sous parcelles comme second facteur. Le phosphate naturel (NPK+ Phosphate naturel) a été utilisé comme source de phosphore et à la même dose de phosphore (10.1 kg P ha⁻¹) que celle apportée par l'engrais minéral NPK recommandé. Dans chaque parcelle principale, les traitements secondaires (fumures) sont disposés au hasard.

Les éléments N, P, K, S et B ont été appliqués par l'engrais complexe NPK, l'urée, le chlorure de potassium, le superphosphate triple ou le phosphate naturel, et aux doses recommandées pour chaque culture (Tableau 3, page 30). L'engrais NPK, le phosphate super triple, le phosphate naturel et le chlorure de potassium sont appliqués au semis. Une dose complémentaire d'azote a été appliquée sous forme d'urée sur le sorgho au 40^{ème} jour après le semis. Le fumier et la dolomie ont été appliqués chaque année au semis et aux doses de 1000 et 3000 kg ha⁻¹ respectivement.

Le sorgho a été semé aux écartements de 0.8 m x 0.4 m avec deux plants par poquet soit 62 500 plants par hectare. Le niébé a été semé aux écartements de 0.4 m x 0.4 m avec deux plants par poquet soit 125 000 plants par hectare. L'arachide a été semée aux écartements de 0.4 m x 0.4 m mais avec un plant par poquet soit 62 500 plants par hectare.

Tableau 6 : Liste des rotations utilisées dans l'études des effets des précédents légumineuses

Numéro rotation	Succession des cultures par années	
	Année 1 (2000)	Année 2 (2001)
1	Sorgho	Niébé Fixateur
2	Niébé Fixateur	Sorgho
3	Sorgho	Arachide
4	Arachide	Sorgho
5	Sorgho	Niébé non Fixateur
6	Niébé non Fixateur	Sorgho
7	Sorgho	Sorgho

2.3.1.2 Évaluation de la fixation symbiotique de l'azote

Les quantités d'azote fixé par l'arachide et le niébé ont été mesurées au champ sur deux années successives à Farako-Bâ avec deux méthodes : la méthode de la différence d'azote total et la méthode de la dilution isotopique utilisant le ^{15}N . La variété de niébé non fixateur d'azote IC-1 (Pemberton, 1990) a été utilisée dans les deux méthodes.

L'azote minéral apporté par les engrais minéraux, influence l'activité symbiotique et les quantités d'azote fixées par les légumineuses (Dixon et Weeler, 1986; Kucey, 1989). Contrairement aux méthodes isotopiques, la méthode de la différence d'azote permet de mesurer la fixation symbiotique de l'azote sans appliquer de l'engrais minéral sur la légumineuse. C'est une méthode simple et rapide. Cependant, elle semble moins précise que les méthodes isotopiques (Rennie, 1984).

La méthode de la dilution isotopique qui utilise le ^{15}N est plus complexe et plus coûteuse. Cependant, elle donne des résultats plus précis que la méthode de la différence d'azote (Hardarson et Danso, 1993). Entre ces deux méthodes, il existe d'autres méthodes ayant leurs avantages et leurs contraintes. Nous avons choisis ces deux méthodes extrêmes pour mesurer la fixation symbiotique de l'azote.

A) Méthode de la différence d'azote total

Le principe de cette méthode consiste à mesurer les prélèvements en azote des deux plantes (fixatrice et non fixatrice) et à déduire par différence l'azote provenant de l'atmosphère (Hardarson et Danso, 1993). La méthode postule que le surplus d'azote de la plante fixatrice provient exclusivement de l'atmosphère. La méthode exige un choix judicieux de la plante témoin non fixatrice, qui doit être physiologiquement très proche de la plante fixatrice. Comme le niébé fixateur d'azote et le niébé non fixateur sont génétiquement plus proches, la méthode de la différence d'azote total a été utilisée pour mesurer l'azote fixé par le niébé. Ainsi, la fixation symbiotique de l'azote par le niébé a été mesurée par les deux méthodes (dilution isotopique et différence d'azote total).

B) Méthode de la dilution isotopique

Le principe expérimental consiste à appliquer l'engrais marqué au ^{15}N sur les deux plantes fixatrices et non fixatrices et à utiliser les rapports des proportions d'excès atomique en ^{15}N des deux plantes pour calculer l'azote fixé selon l'équation (2) (Fried et Middlebo, 1977).

$$\text{N-fixé (kg ha}^{-1}\text{)} = \left(1 - \frac{\% \text{ excès } ^{15}\text{N plante fixatrice}}{\% \text{ excès } ^{15}\text{N plante non fixatrice}}\right) \times \frac{\text{N-total (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Plante fixatrice}} \quad (2)$$

Comme la méthode de la dilution isotopique exige l'application d'un minimum d'azote sur la légumineuse pour mesurer l'azote fixé, nous avons utilisé de très faibles doses d'azote afin de minimiser l'influence de l'engrais azoté sur l'activité symbiotique tout en s'assurant que l'excès atomique en ^{15}N de l'échantillon de plante sera détectable par les appareils de mesure. Tenant compte des suggestions de certains auteurs sur les doses d'azote utilisables sans influencer l'activité symbiotique (Kucey, 1989) et de l'expérience du laboratoire de l'Agence International d'Énergie Atomique(AIEA) (Hardarson et Danso, 1993), nous avons utilisé l'engrais marqué ^{15}N à des doses inférieures à 15 Kg N ha^{-1} .

Nous avons délimité des micros parcelles de $1.2 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (soit 0.96 m^2) au sein des sous parcelles dans lesquelles nous avons appliqué l'engrais marqué au ^{15}N . Les parcelles étaient délimitées par des tôles enfoncées à 15 cm de profondeur dans le sol et ayant une hauteur de 45 cm au-dessus du sol.

En 2000, nous avons mesuré la fixation symbiotique de l'azote sur les sous parcelles recevant la fumure NPK sur trois répétitions en utilisant de l'urée marquée ^{15}N à 5% d'excès atomique et à la dose de 14 kg N ha^{-1} en un seul apport quatre jours après le semis. En 2001, nous avons utilisé les sous parcelles recevant les fumures NPK, NPK+Dolomie et NPK+Fumier sur trois répétitions. Le sulfate d'ammonium marqué à 10% d'excès atomique ^{15}N et dosant 21.2 % N a été utilisé à la dose de 9.7 kg N ha^{-1} en un seul apport quatre jours après le semis.

Afin d'assurer une homogénéité d'application du ^{15}N et un égal accès des plantes à l'azote (Vose et Victoria, 1986), les engrais marqués ont été dissous dans l'eau et appliqués uniformément dans chaque micro parcelle.

Les plants des micros parcelles ont été récoltés à la maturité physiologique. Seule la partie aérienne de la plante est récoltée. Les échantillons sont séchés d'abord à l'air pendant 8 jours et à l'étuve à 60°C pendant 72 heures puis pesés et broyés pour le dosage de l'azote total et des excès atomiques en ^{15}N . Les excès atomiques en ^{15}N des échantillons ont été déterminés par spectrométrie de masse (Fieldler, 1984) au laboratoire de l'AIEA. Les

quantités d'azote fixé par les légumineuses ont été calculées selon l'équation (2) (Fried et Middleboe, 1997).

2.3.1.3 Suivi de l'azote minéral du sol

Afin d'évaluer les effets des précédents légumineuses sur la disponibilité de l'azote dans le sol, l'azote minéral total ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) a été mesuré sur les parcelles en deuxième année (2001) dans les trois rotations (Arachide-Sorgho, Niébé-Sorgho et Sorgho-Sorgho). Sur chaque rotation, nous avons échantillonné le sol dans les quatre répétitions sur les sous parcelles recevant l'engrais minéral NPK, NPK+Fumier et le Témoin non fertilisé. Les échantillons ont été prélevés au semis et une semaine après le semis avant l'application des engrais et dans l'horizon 0-20cm. Sur l'échantillon fraîchement prélevé, nous ajoutons une solution molaire de chlorure de potassium. Après une agitation de 20 minutes, un extrait est recueilli par filtration et l'azote minéral est dosé par colorimétrie selon la procédure décrite par Keeney (1982).

2.3.1.4 Évaluation de la population des nématodes

Les effets des légumineuses sont généralement mesurés en comparant les rotations incluant les légumineuses avec les monocultures de plantes non fixatrices. Cependant, les monocultures comportent en elle même le risque de sélectionner et d'entretenir par exemple des parasites spécifiques à la monoculture, et qui peuvent entraîner des baisses de rendements. Par contre, les rotations culturales avec ou sans légumineuses, ont l'avantage de briser le cycle d'infection des parasites éventuels (Oswald et Ranson, 2001). En comparant une rotation Légumineuse-Céréale à une monoculture de céréale sensible aux nématodes par exemple, on peut surestimer l'effet 'azote' de la légumineuse si on ne tient pas compte des pertes de rendements dus aux parasites (Bullock, 1992 ; Chalk, 1993 ; Wani et al., 1995). Bagayoko et al., (2000) indiquent que dans les rotations

Légumineuses-Céréales, les légumineuses influencent l'infection des sols par les nématodes.

Pour mieux apprécier les effets des légumineuses sur les sols et les rendements des cultures, nous avons évalué les effets des précédents légumineuses sur l'infection du sol et du sorgho subséquent par les nématodes en 2001. Les genres et les populations totales de nématodes dans le sol et dans les racines du sorgho ont été déterminés. Les nématodes ont été évalués sur tous les traitements dans le sol au semis et dans les racines au 60^{ème} et au 90^{ème} jour après le semis.

2.3.2 Valeur de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses

La valeur de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) d'une légumineuse est une mesure de la contribution en azote de la légumineuse et son impact sur le rendement de la culture venant après la légumineuse. Dans notre étude, les VRFA devraient nous permettre de vérifier notre deuxième hypothèse portant sur l'augmentation de la nutrition azotée par les légumineuses.

2.3.2.1 L'expérimentation agronomique

Les VRFAs des deux légumineuses ont été mesurés à Farakô-Ba par une expérimentation agronomique qui a été conduite pendant deux années (2000 et 2001). Les VRFAs pouvaient être mesurées en utilisant la monoculture du sorgho comme témoin. Cependant, la monoculture peut influencer les VRFAs à cause des effets néfastes liés entre autres au phénomène d'allélopathie (Stoop *et al.*, 1983) et au développement éventuel des parasites spécifiques au sorgho (Chalk, 1993), pouvant influencer les résultats. Pour cette raison, nous avons utilisé le précédent maïs comme deuxième rotation témoin.

A) Première année

À la première année (2000), nous avons utilisé un dispositif en blocs de Fisher comprenant 4 traitements (Tableau 7, page 39) correspondant à quatre cultures (arachide, niébé, maïs et sorgho) utilisées comme précédents pour le sorgho qui sera cultivé l'année suivante (2001). Le dispositif comportait 4 répétitions et les traitements étaient disposés de façon aléatoire au sein des blocs. Chaque parcelle mesurait 12.5 m x 13 m, soit 162.5 m².

Les cultures ont été fertilisées avec l'engrais minéral NPK et l'urée qui sont appliqués aux doses d'éléments nutritifs recommandés pour chaque culture (Tableau 3, page 30). Une deuxième dose d'azote est appliquée sur les céréales (maïs, sorgho) au 40^{ème} jour après le semis pour compléter la doses recommandée pour ces cultures.

B) Deuxième année

Le sorgho a été cultivé sur toutes les parcelles à la deuxième année (2001). Chaque parcelle a été subdivisées en cinq sous parcelles de 4 m x 6 m, soit 24 m². Dans les 5 sous parcelles nous avons appliqué 5 doses d'engrais azoté (0, 20, 40, 60 et 80 kg N ha⁻¹) sous forme d'urée pour étudier la réponse du sorgho à l'azote en fonction du précédent cultural. Le dispositif expérimental devenait alors un factoriel 4x5 disposé en split-plot avec les 4 précédents (arachide, niébé, maïs et sorgho) comme facteur principal et les 5 doses d'azote comme second facteur. Dans chaque parcelle principale les sous traitements (doses d'azote) ont été repartis de façon aléatoire.

Les éléments P, et K ont été appliqués au semis sous forme de superphosphate tripe et de chlorure de potassium et aux doses recommandées pour le sorgho (Tableau 3, page 30). L'azote est appliqué en deux fractions à raison de 1/3 de la dose au semis et 2/3 au 40^{ème} jour après le semis.

Le sorgho a été semé aux écartements de 0.8 m x 0.4 m et démarié à deux plants par poquet soit 62 500 plants par hectare. Le niébé et l'arachide ont été semés aux écartements de 0.4 m x 0.4 m. Le niébé a été démarié à 2 plants par poquet soit 125 000

plants par hectare alors que l'arachide a été semée à un plant par poquet soit 62 500 plants par hectare.

Tableau 7 : Liste des rotations utilisées pour mesurer les valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses

Numéro Rotation	Succession des cultures	
	Année 1 (2000)	Année 2 (2001)
1	Niébé	Sorgho
2	Arachide	Sorgho
3	Maïs	Sorgho
4	Sorgho	Sorgho

2.3.2.2 Détermination des valeurs de remplacement en fertilisant azoté

Les valeurs de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) ou équivalent azote des légumineuses ont été déterminées selon la méthode décrite par Hesterman *et al* (1987). Elle consiste à exprimer la contribution de la légumineuse au rendement du sorgho en quantité équivalente d'azote que la légumineuse est susceptible d'apporter au sorgho en continue pour atteindre le même niveau de rendement.

Comme toutes les parcelles ont été cultivées avec du sorgho la deuxième année, les variations de rendements sont dus aux précédents culturaux et à l'engrais azoté. Comme l'azote a été appliqué aux mêmes doses croissantes (0-20-40-60 et 80 kg N ha⁻¹) sur chaque précédent, nous pouvons comparer les effets des précédents en fonction des doses d'engrais utilisé. S'il y a des effets positifs des légumineuses sur le sorgho, les rendements des précédents devraient être supérieurs à ceux des deux rotations témoins (Maïs-Sorgho et Sorgho-Sorgho).

Les VRFAs des légumineuses sont déterminées par rapport aux précédent maïs à l'aide des courbes de réponse à l'azote. Les rendements des précédents légumineuses étant plus élevés; les surplus de rendements sont attribuables à l'effet azote des légumineuses quand

on n'applique pas de l'engrais azoté. Autrement dit, le surplus de rendement du précédent légumineuse en absence de tout apport d'azote, est dû à l'azote apporté par la légumineuse. Rapporté sur la courbe de réponse des précédents témoins (maïs et sorgho), les rendements des précédents légumineuses déterminent les doses équivalentes d'azote qui devraient être appliquées pour atteindre ces rendements.

La VRFA d'une légumineuse peut se définir comme étant la dose correspondante d'azote à appliquer sur la monoculture de céréale (Sorgho-Sorgho ou Maïs-Sorgho) pour atteindre le même rendement en absence de tout apport d'engrais azoté (Hesterman *et al.* 1987 ; Mvondo Awono, 1997). Ainsi, la VRFA peut être déterminée graphiquement sur les courbes de réponse, ou par le calculs en utilisant les équations des courbes de réponse à l'engrais azoté.

2.3.2.3 Détermination des besoins en engrais azoté selon le précédent cultural

En fonction du précédent cultural, les besoins en engrais azoté du sorgho ont été déterminés en 2001 en utilisant les courbes de réponse à l'azote. Parmi les nombreuses méthodes disponibles, nous avons utilisé la méthode linéaire-plateau de Cerrato et Blackmer (1990). C'est une méthode simple et rapide qui permet de déterminer les besoins en azote avec une bonne précision (Cerrato et Blackmer, 1990 ; Cescas, 1991).

2.3.3 Effets à long terme des légumineuses sur les cultures et le sol

Les études permettant d'évaluer les effets des légumineuses sur les rendements de la culture succédant à la légumineuse ont été menées sur deux années successives. Cependant, les effets liés aux propriétés chimiques des sols sont difficilement appréciables par des expérimentations de courte durée. Certaines propriétés des sols évoluent moins vite, et il est nécessaire d'évaluer les effets des légumineuses sur plusieurs années pour mieux apprécier leur contribution à la fertilité des sols. C'est l'objectif de cette partie de notre recherche. Nous avons utilisé deux expérimentation de longue durée

sur les deux sites (Kouaré et Farakô-Ba) pour évaluer les effets à long terme des rotations utilisant les légumineuses sur les sols. Les effets des rotations sur la nutrition minérale, les rendements des cultures et les propriétés chimiques des sols et les nématodes ont été évalués sur 8 années à Kouaré en zone soudanienne et sur 9 années à Farako-Bâ en zone guinéenne.

2.3.3.1 Les dispositifs expérimentaux

Sur chaque site, nous avons utilisé les cultures couramment pratiquées par les producteurs dans la région pour établir les rotations culturales utilisées dans l'expérimentation. Le sorgho qui est la principale céréale du pays a été utilisé sur les deux sites. En plus du sorgho, le cotonnier et l'arachide qui sont couramment cultivées dans la zone guinéenne ont été utilisées à Farakô-Ba. Le niébé, principal culture légumineuse de la zone soudanienne a été utilisé à Kouaré.

A) Site de Farako-Bâ

Le dispositif est un factoriel 10x8 en split-plot avec 4 répétitions. Les 10 traitements correspondaient à 10 rotations culturales utilisées comme facteur principal et 8 fumures comme facteur secondaire. Nous avons utilisé 5 séquences de rotation (Sorgho-Sorgho, Sorgho-Coton-Arachide, Sorgho-Arachide-Coton, Artachide-Arachide et Sorgho-Jachère). La liste des traitements et le plan de rotation des cultures sont présentés ans le Tableau 8 (page 43). Les huit traitements secondaires correspondaient à 8 fumures (NPK recommandé, NPK+dolomie, NPK+Résidus de récolte, PK+Résidus de récolte, PK+Fumier, PK+Compost, PK et Témoin sans engrais).

Noua avons utilisé des parcelles principales de 17.5 m x 12.5 m, soit 218.75 m² chacune. Dans chaque répétition, les traitements principaux ont été disposés au hasard. Chaque parcelle principale a été subdivisée en 8 sous parcelles de 4m x 6m, soit 24 m² chacune. Les fumures (second facteur) ont été disposées au hasard dans les sous parcelles.

B) Site de Kouaré

À Kouaré nous avons utilisé un dispositif factoriel 5 x 6 en split-plot avec 4 répétitions. Les 5 traitements correspondaient à 5 rotations culturales utilisées comme facteur principal et 6 fumures comme facteur secondaire. Trois séquences de rotation (Sorgho-Sorgho, Sorgho-Niébé, Sorgho-Jachère) ont été étudiées. La liste des traitements et le plan de rotation des cultures sont présentés dans le Tableau 8, page 43. Les 6 traitements secondaires correspondaient à 6 fumures (NPK recommandé, NPK+dolomie, NP+Résidus de récolte, P+Résidus de récolte, P+Fumier, Témoin sans engrais).

Nous avons utilisé des parcelles principales de 17.5 m x 12.5 m, soit 218.75 m² chacune. Les rotations ont été réparties au hasard dans les parcelles principales. Chaque parcelle principale a été subdivisée en 6 sous parcelles de 4 m x 6 m, soit 24 m² chacune et les traitements fumures ont été repartis au hasard dans les sous parcelles.

Sur les deux sites, l'engrais complexe NPKSB, le super phosphate triple et le chlorure de potassium ont été appliqués au semis. Le fumier et le compost ont été appliqués au semis et aux doses de 3000 et 5000 kg ha⁻¹ respectivement. Dans les traitements avec résidus de récolte, ce sont les paille ou les fanes de la culture précédente qui ont été réincorporés chaque année dans le sol. La dolomie a été appliquée au semis à la dose annuelle de 1000 kg ha⁻¹ correspondant à 350 et 190 kg ha⁻¹ de CaO et MgO respectivement. Le phosphate super triple (20.1 % P) et le chlorure de potassium (47 % K) ont été utilisés pour compléter les doses des éléments nutritifs selon les cultures (Tableau 3, page 30). L'urée ordinaire dosant 46% d'azote a été utilisée uniquement sur le sorgho et le cotonnier en deuxième application (40 jours après le semis) pour compléter les doses d'azote recommandées pour ces cultures.

Le sorgho et le cotonnier ont été semés à 0.80 m x 0.40 m et démarrié à 2 plants par poquet soit 62 500 plants par hectare. L'arachide a été semée aux écartements de 0.40m x 0.40 m à raison d'un plant par poquet soit 62 500 plants par hectare et le niébé aux écartements de 0.40m x 0.40m à raison et de deux plants par poquet, soit 125 000 plants par hectare.

Tableau 8 : Liste des rotations culturales utilisées dans les expérimentations de longue durée de Farakô-Ba et Kouaré

Sites	No	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Farako-Bâ	1	sorgho								
	3	sorgho	coton	arachide	sorgho	coton	arachide	sorgho	coton	arachide
	4	coton	arachide	sorgho	coton	arachide	sorgho	coton	arachide	sorgho
	5	arachide	sorgho	coton	arachide	sorgho	coton	arachide	sorgho	coton
	6	sorgho	arachide	coton	sorgho	arachide	coton	sorgho	arachide	coton
	7	coton	sorgho	arachide	coton	sorgho	arachide	coton	sorgho	arachide
	8	arachide	coton	sorgho	arachide	coton	sorgho	arachide	coton	sorgho
	9	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère
	10	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho
	Kouaré	1	*	sorgho						
2		*	sorgho	niébé	sorgho	niébé	sorgho	niébé	sorgho	niébé
3		*	niébé	sorgho	niébé	sorgho	niébé	sorgho	niébé	sorgho
4		*	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère
5		*	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho	jachère	sorgho

* L'expérimentation de Kouaré a été mis en place en 1994

2.3.3.2 L'absorption de N et P et le recouvrement de N

Sur les deux sites, nous avons utilisé l'azote marqué au ^{15}N en 2001 pour mesurer les proportions d'azote provenant du sol et des engrais et les coefficients réels d'utilisation de l'azote par le sorgho. Les prélèvements du P total par le sorgho ont été mesurés à Farakô-Ba uniquement.

A) Application du ^{15}N au champ

À Farako-Bâ, le ^{15}N a été appliqué dans 3 sous parcelles fumure (NPK, NPK+Dolomie, PK+Fumier) dans 4 rotations (coton-arachide-sorgho, arachide-coton-sorgho, jachère-sorgho et sorgho-sorgho) et dans 3 blocs. À Kouaré le ^{15}N a été appliqué sur les sous parcelles recevant la fumure minérale NPK dans 4 rotations (Niébé-sorgho, jachère-sorgho et sorgho-sorgho) et sur 3 blocs. L'urée marquée à 5 % d'excès atomique en ^{15}N a été utilisée à la dose de 24 kg N ha^{-1} à la montaison (40 jours après le semis).

Nous avons délimité des micro-parcelles de $3.2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$, soit 5.12 m^2 au sein des sous parcelles. Les micro-parcelles ont été délimitées par des tôles enfoncées à 15 cm de profondeur dans le sol et ayant une hauteur de 45 cm au-dessus du sol. L'engrais marqué a été dissous dans l'eau et appliqué uniformément afin d'assurer une distribution homogène de l'azote dans les micros placettes pour permettre un égale accès des plantes à l'azote.

Les plants des micro-parcelles ont été récoltés à la maturité physiologique. Nous avons récolté toute la partie aérienne des 4 poquets centraux en éliminant les poquets de bordure. Les échantillons ont été séchés d'abord à l'air pendant 15 jours et à l'étuve à 60°C pendant 72 heures, puis pesés et broyés. Les excès atomiques en ^{15}N ont été dosés par spectrophotométrie de masse (Fieldler, 1984) au laboratoire de l'AIEA.

B) Mesure du recouvrement de l'azote

Le principe consiste à calculer d'abord les proportions d'azote absorbé par la plante et provenant de l'engrais (Ndff) et du sol (Ndfs) selon les équations 4 et 5 respectivement (Fried et Dean, 1952 ; Hauck, 1973 ; Hauck et Weaver, 1986 ; Warenbourg, 1993 ; Tran et al., 1996).

$$\text{Ndff}(\%) = \frac{\% \text{ excès } ^{15}\text{N dans la plante.}}{\% \text{ excès } ^{15}\text{N dans l'engrais.}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Ndfs}(\%) = 100 - \frac{\% \text{ excès } ^{15}\text{N dans la plante}}{\% \text{ excès } ^{15}\text{N dans l'engrais}} \times 100 \quad (5)$$

Les quantités d'azote absorbé par la plante et provenant de l'engrais (Ndff) et du sol (Ndfs) ont été déduites des pourcentages d'azote provenant de l'engrais et du sol (4 et 5) après détermination de la quantité d'azote totale contenu dans la plante (6 et 7).

$$\text{Ndff (kg N ha}^{-1}\text{)} = \text{Ndff}(\%) \times \text{N-Plante} \quad (6)$$

$$\text{Ndfs (kg N ha}^{-1}\text{)} = \text{Ndfs}(\%) \times \text{N-Plante} \quad (7)$$

N-Plante étant la quantité d'azote total mobilisé par la plante.

Le recouvrement de l'azote ou coefficient réel d'utilisation de l'azote (CRU) a été ensuite calculé en pourcentage d'azote absorbé par la plante et provenant de l'engrais par rapport à la quantité totale d'azote appliqué sous forme d'engrais (8).

$$\text{CRU (\%)} = \text{Ndff (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{N appliqué (kg ha}^{-1}\text{)} \times 100 \quad (8)$$

2.3.3.4 Suivi de l'azote minéral du sol

Les effets à long terme des rotations sur l'azote minéral total du sol ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) ont été évalués en 2001 sur l'expérimentation de Farakô-Ba uniquement.

L'azote minéral a été évalué périodiquement pendant 6 semaines. Les échantillons de sol ont été prélevés au semis, au 8^{ème}, 15^{ème}, 29^{ème} et au 44^{ème} jours après le semis. Le sol a été échantillonné sur trois répétitions dans les 8 sous parcelles fumures (NPK recommandé, NPK+dolomie, PK+Fumier, PK+Compost, NPK + Résidus, PK+Résidus, PK, Témoin sans engrais) dans 4 rotations culturales (arachide-coton-sorgho, coton-arachide-sorgho, sorgho-jachère et sorgho-sorgho) et sur le sol resté en jachère depuis le début de l'expérimentation.

Les échantillons ont été prélevés dans l'horizon 0-20cm. L'azote minéral a été extrait comme précédemment par agitation pendant 20 minutes dans une solution molaire de KCl et dosé par colorimétrie selon la procédure décrite par Keeney (1982).

2.3.3.5 Les propriétés chimiques du sol et les nématodes

Les effets des rotations et des fumures sur les principales propriétés des sols ont été évalués en 2001 sur les deux sites. À la fin de la saison agricole, les sols des deux expérimentations ont été échantillonnés et leurs principales caractéristiques ont été mesurés et comparées avec le sols du départ. Les échantillons ont été prélevés dans l'horizon 0-20 cm.

Les effets à long terme des rotations culturales sur l'infection du sol et des racines du sorgho par les nématodes ont été évalués en 2001 sur le site de Farakô-Ba uniquement.

Les nématodes ont été évalués dans le sol au semis et dans les racines au 60^{ème} et au 90^{ème} jour après le semis. Les genres et le nombre total de nématodes ont été déterminés.

2.3.4 Méthodes d'analyses

2.3.4.1 Analyse des sols et des plantes

La granulométrie a été mesurée après oxydation de la matière organique avec de l'eau oxygénée suivie d'une dispersion avec une solution de $(\text{NaPO}_3)_6$ (Van Reeuwijk, 1993).

Le pH-H₂O et pH-KCl des sols ont été mesurés par lecture directe au pH-mètre selon un rapport sol/eau distillée de 1 : 2.5 et sol/KCl 1M de 1 : 2.5 respectivement après un temps d'équilibre de 4 heures (McLean, 1982). L'acidité d'échange a été extraite par une solution de KCl 1M et titré avec du NaOH (Houba et al., 1995).

Les bases échangeables (Na^+ , K^+ , Ca^{3+} , Mg^{2+}) ont été extraites à l'acétate d'ammonium (NH_4Oac) et dosées par spectroscopie d'absorption atomique pour Ca, Mg et spectroscopie d'émission à flamme pour Na et K (Houba *et al.*, 1995). La capacité d'échange cationique effective (ECEC) correspond à la somme des bases du complexe d'échange

Le carbone organique a été dosé selon la méthode Walkley & Black (1934). Le phosphore assimilable des sols a été extrait par une solution de fluorure d'ammonium et d'acide chlorhydrique selon la méthode Bray I (Fixen et Grove, 1990). Le phosphore total et l'azote total des sols et des plantes, le potassium, le calcium et le magnésium totaux des plantes ont été extraits par digestion dans un complexe d'acide sulfurique, acide salysilique, d'eau oxygénée et de sélénium. Le phosphore assimilable et le phosphore total des plantes et des sols ont été dosés ensuite par colorimétrie selon la méthode du molybdo-phosphate réduit à l'acide ascorbique. L'azote total des sols et des plantes a été dosé par colorimétrie à l'auto-analyseur. Le calcium et le magnésium des plantes ont été

dosés par spectrophotométrie d'absorption alors que le potassium a été dosé par spectrophotométrie à émission de la flamme (Houba *et al.*, 1995).

2.3.4.2 Extraction et évaluation des nématodes

Les sols ont été échantillonnés dans l'horizon 0-20 cm. Les nématodes ont été extraits par un lavage à l'eau selon la méthode de l'éluutriateur de Seinhorst (1962). Les échantillons de racines ont été prélevés sur les plantes de bordure qui ne sont pas utilisées pour les calculs des rendements. L'extraction des nématodes racinaires a été faite par la méthode à l'asperseur de Seinhorst (1950).

À cause des valeurs nulles et des coefficients de variations souvent élevés des données brutes, nous avons fait une transformation des données par la fonction logarithmique (9) avant l'analyse (Steel et Torrie, 1990).

$$y = \log x + 1 \quad (9)$$

x : le nombre de nématodes et,

y : la valeur transformée

Chapitre 3 : Résultats et discussions

3.1 Rendements des légumineuses et fixation symbiotique de l'azote

L'efficacité de l'activité symbiotique dépend des souches de rhizobia, de la plante hôte et des conditions environnementales (Dommergues et al., 1999). La nature du sol et la disponibilité des éléments nutritifs influencent l'activité des rhizobia et de la plante, et l'efficacité de l'activité symbiotique. Avant d'examiner les résultats sur la fixation symbiotique de l'azote, nous présentons d'abord les données sur les rendements des légumineuses afin d'évaluer l'importance de la fertilisation sur la fixation symbiotique de l'azote fixé.

3.1.1 Les rendements des légumineuses

Les résultats sont présentés dans le Tableau 9 (page 52). De façon générale, les fumures ont augmenté les rendements des légumineuses. Les effets des fumures ont été plus marqués en deuxième année. Ceci peut s'expliquer par l'effet de la jachère. Le sol était en jachère depuis 7 années et les rendements élevés en première année sont dus à l'effet de la jachère qui a probablement atténué les réponses aux engrais.

3.1.1.1 L'arachide

Les fumures ont influencé significativement les rendements en fanes de l'arachide pendant les deux années de culture (Tableau 9, page 52). Les fumures ont augmenté les rendements en fanes de l'arachide de 9 à 34% en première année et de 8 à 66% en deuxième. Les rendements en fanes de l'arachide ont été faibles quand on n'utilisait pas de l'engrais azoté. Par rapport à la fumure PK sans azote, l'engrais minéral NPK a augmenté les rendements en fane de l'arachide de 30 à 54%. La présence de l'azote augmentait également les rendements en grains de l'arachide de 26 à 36%, ce qui indique

que la faible dose d'azote apportée par l'engrais minéral était nécessaire pour augmenter les rendements de l'arachide.

La dolomie et le fumier n'ont pas eu d'effet significatif sur les rendements en grains de l'arachide pendant les deux années. Cependant, le fumier a eu un effet significatif sur les rendements en fane de l'arachide. Comparativement à la fumure minérale NPK, la fumure organo minérale (NPK + Fumier) augmentait les rendement en fane de l'arachide de 6 à 20%.

3.1.1.2 Le niébé

Les fumures ont influencé significativement les rendements en graines et en fanes du niébé pendant les deux années de culture (Tableau 9, page 52). Elles ont augmenté les rendements en fanes de 20 à 148% en première année et de 12 à 177% en deuxième année. Comparativement au témoin, les fumures ont également influencé les rendements en grains de 8 à 68% en première année et de 48 à 140% en deuxième année.

Les rendements du niébé étaient également faibles quand on n'utilisait pas de l'engrais azoté dans la fumure. Par rapport à la fumure PK sans azote, l'engrais minéral NPK a augmenté les rendements en grains et en fanes du niébé de 10 et 12% respectivement.

Le fumier a augmenter significativement les rendements du niébé. La fumure organo minérale (NPK+Fumier) a augmenté les rendements en fanes et en grains de 28 à 56 et de 9 à 14% respectivement.

Tableau 9 : Effets des fumures sur les rendements (kg ha^{-1}) de l'arachide et du niébé à Farako-Bâ

Année	Fumures	Arachide		Niébé	
		Graine	Fane	Graine	Fanes
Première Année (2000)	NPK recommandé	958 ^a	3153 ^a	1139 ^{abc}	2143 ^c
	NPK+Dolomie	994 ^a	2790 ^b	1203 ^{ab}	2930 ^b
	NPK+Fumier	889 ^a	3358 ^a	1307 ^a	3350 ^a
	NK+BP	862 ^a	2892 ^b	835 ^e	1621 ^d
	PK	622 ^b	2723 ^b	1040 ^{bcd}	1907 ^f
	Témoin	679 ^b	2502 ^{bc}	777 ^{ef}	1351 ^{de}
	Bloc	*	ns	ns	*
Fumure (F)	**	*	*	***	
Deuxième Année (2001)	NPK recommandé	1142	3919 ^b	885 ^{bc}	2606 ^{bc}
	NPK+Dolomie	1188	4055 ^b	957 ^{ab}	2982 ^{ab}
	NPK+Fumier	963	4773 ^a	973 ^a	3345 ^a
	NK+BP	994	3186 ^{cd}	601 ^e	1559 ^e
	PK	879	3450 ^c	821 ^{bcd}	2325 ^{cd}
	Témoin	900	2874 ^e	407 ^f	1209 ^f
	Bloc	ns	***	**	***
Fumure (F)	ns	***	***	***	

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00 ; ns : Non significatif ($p > 0.05$)
 Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

3.1.1.3 Discussion

Les effets positifs des éléments nutritifs sur les rendements des légumineuses ont été observé dans plusieurs travaux (Dennis, 1977; Dart et al., 1977; Dakora, 1985; Bationo et Ntare, 2000; Fening *et al.*, 2001). Comme toutes les cultures, les légumineuses ont des besoin en éléments nutritifs qui, selon leur disponibilité influencent leurs rendements. Buerkert et al. (2001) ont montré que le phosphore augmentait les rendement de l'arachide de 28 à 72%. Les amendements minéraux et organiques comme la dolomie et le fumier apportent des éléments nutritifs et neutralisent l'acidité du sol, expliquant leurs effets parfois significatifs sur les rendements en fanes des légumineuses.

Même l'engrais azoté est nécessaire pour améliorer les rendements des légumineuses. Conformément à nos résultats et ceux obtenus par d'autres recherches (Abdel-Ghaffar, 1981; Bationo et Ntare, 2000; Fening *et al.*, 2001), un minimum d'engrais azoté est nécessaire dans les sols pauvres pour améliorer les rendements des légumineuses et peut aussi s'expliquer par l'incapacité de la légumineuses à fixer l'azote au début de son cycle. La nodulation est un processus qui s'établit plus ou moins lentement (Dommergues *et al.*, 1999) et elle ne peut commencer que lorsque la plante a développé un enracinement permettant d'accueillir les rhizobia. Pendant cette période, la légumineuse a un besoin en azote qui, s'il n'est pas comblé par le sol ou les engrais, peut limiter son développement et diminuer les rendements.

En influençant les rendements des légumineuses, les éléments nutritifs influencent probablement les capacités des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique. Nous avons mesuré l'azote fixé par les deux légumineuses et les effets des différentes fumures sur la fixation symbiotique de l'azote.

3.1.2 La fixation symbiotique de l'azote

Les résultats sont présentés dans le Tableau 10 (page 56). La plante test de référence (le niébé non fixateur d'azote) permettait d'appliquer les deux méthodes (dilution isotopique et différence d'azote) pour mesurer fixé par le niébé. L'azote total fixé par la plante non fixatrice de référence est supérieur à celui de l'arachide. La méthode de la différence d'azote n'est donc pas applicable pour mesurer l'azote fixé par l'arachide en utilisant le niébé non fixateur comme référence. C'est la contrainte classique imposée par cette méthode qui exige un choix très approprié de la plante non fixatrice de référence (Warembourg, 1993). Par conséquent, seule la méthode de la dilution isotopique a été utilisée pour mesurer l'azote fixé par l'arachide.

Pendant les deux années, les résultats ont montré qu'il y avait pas de différences statistiquement significatives entre les pourcentages d'azote des légumineuses. Cependant, l'azote total mobilisé par le niébé était significativement plus élevé que celui de l'arachide. Cela s'explique par les quantités de biomasse produites par les deux légumineuses. Les données précédents sur les rendements avaient montré que le niébé produisait plus de biomasse que l'arachide. Il n'y a pas de différence sur les pourcentages d'azote mais sur l'azote total, la plus grande biomasse du niébé permet de mettre en évidence la supériorité du niébé sur l'arachide.

3.1.2.1 La fixation de l'azote par les légumineuses

A) L'arachide

En première année (2000), l'arachide a mobilisé au total 70 kg N ha⁻¹. L'arachide avait fixé 23 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère. Ainsi l'arachide fixait 34 % de son azote total dans l'atmosphère, et elle prélevait 64% de ses besoins en azote dans le sol (Tableau 10, page 56). En 2001, l'arachide mobilisait au total 31 kg N ha⁻¹. Elle fixait seulement 8 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère soit 27 % de ses besoins en azote. Ainsi l'arachide a utilisé l'azote du

sol pour combler 66 à 73% de ses besoins en azote. Elle a comblé 27 à 34% des ses besoins en azote en utilisant l'azote de l'atmosphère

Ces résultats sont assez comparables à ceux obtenus par Rusli *et al.* (1998). En utilisant la même méthode de la dilution isotopique avec le ^{15}N dans une expérimentation au champ en Malaisie sur 30 variétés d'arachide, ces auteurs ont trouvé que l'arachide fixait entre 5 et 61 kg N ha⁻¹ correspondant à 19 à 39% de leurs besoins en azote. Dans une revue de littérature portant sur la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses tropicales, Peoples et Herridge (1990) ont montré que la plus grande parties des travaux de recherche situent le potentiel de fixation de l'arachide entre 30 à 130 kg N ha⁻¹. Dans cette synthèse bibliographique, Peoples et Herridge (1990) ont conclu que sans inoculation avec des souches sélectionnées de Rhizobiums, l'arachide fixe entre 22 à 49% de son azote total dans l'atmosphère. L'inoculation du sol par des souches performantes peut améliorer le potentiel de fixation d'azote chez l'arachide. Cependant, Peoples et Herridge (1990) ont montré que même avec l'inoculation, la plupart des travaux situent le potentiel de fixation d'azote de l'arachide entre 68 et 116 kg N ha⁻¹, représentant 47 à 78% de ses besoins en azote.

Ces différents résultats montrent que l'arachide est relativement moins performante dans la fixation symbiotique de l'azote comparativement au niébé. Pour améliorer la capacité de fixation de l'azote de l'arachide, de nombreux travaux de recherche se sont même orientées vers la sélection variétale (Nguyen Xuan Hong, 1998 ; Rusli et al, 1998). En utilisant la méthode de la dilution isotopique avec le ^{15}N dans une étude au champ sur cinq variétés d'arachide sélectionnées pour leur aptitude à fixer l'azote, Nguyen Xuan Hong (1998) a montré que la sélection variétale pouvait permettre à l'arachide d'atteindre 36 à 56% de ses besoins en azote par la fixation symbiotique. Les plus grands potentiels de fixation symbiotique obtenus sur l'arachide par la sélection variétale varient entre 65 et 121 kg N ha⁻¹ (Rusli et al, 1998). Par une étude en serre avec la méthode très précise de l'abondance naturelle en ^{15}N , Cadisch et al. (2000) ont trouvé que l'arachide fixait 45 à 54% de son azote dans l'atmosphère.

Tableau 10 : Azote total et pourcentage d'azote fixé par l'arachide et le niébé selon les méthodes de la dilution isotopique et de la différence d'azote en 2000 et 2001 à Farako-Bâ.

		----- Azote-fixé -----					
		N - Plante		Dilution Isotopique		Différence d'azote	
		(%)	Kg ha ⁻¹	(%) ¹	kg ha ⁻¹	(%)	kg ha ⁻¹
Année 2000	Arachide	2.85	70 ^{bc}	34	23 ^b	na	na
	Niébé	3.53	222 ^a	52	115 ^a	64	143
	Niébé Test	3.22	79 ^b	.	.	na	na
	Bloc	ns	*	ns	ns	ns	ns
	Légumineuse	ns	*	ns	*	na	na
Année 2001	Arachide	3.65	31 ^{bc}	27 ^b	8 ^b	na	na
	Niébé	3.36	59 ^a	56 ^a	33 ^a	25	15
	Niébé Test	2.38	44 ^b	na	na	na	na
	Bloc	ns	ns	ns	ns	*	ns
	Légumineuse	***	***	*	*	na	na
	Fumure	ns	ns	*	*	ns	ns
	Lég. x Fum.	ns	ns	ns	ns	na	na

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00 ; ns : Non significatif ($p > 0.05$)
 Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher
 na : Non applicable; Niébé test : Niébé non fixateur d'azote utilisé comme plante test

D'autres résultats comme ceux de Dakora (1985) semblent montrer que l'arachide peut avoir un potentiel de fixation plus élevé. En utilisant la méthode de la différence d'azote total sur dix variétés d'arachide avec le maïs comme plante test, Dakora (1985) a trouvé que sans inoculation, l'arachide fixait 32 à 100 kg ha⁻¹ d'azote, correspondant à 62 à 84% de ses besoins en azote. Le pourcentage élevé d'azote provenant de l'atmosphère est dû probablement à la méthode et à la plante test. Le maïs n'est probablement pas bien indiqué pour mesurer l'azote fixé par l'arachide avec la méthode de la différence d'azote total. Il est donc probable que la méthode de la différence d'azote surestime la quantité d'azote fixée par l'arachide. Quel que soit la plante test utilisée, beaucoup de recherches

ont montré que la méthode de la différence d'azote surestimait les quantités d'azote fixé par les légumineuse de 20 à 30% comparativement à la méthode de la dilution isotopique (Hauck et al., 1986 ; Hardarson et Danso, 1993 ; Khan et Yoshida, 1994 ; Trytsman, et Smith 1998). L'influence inévitable des teneurs du sol en azote serait le principal facteur qui rend la méthode moins précise (Rennie, 1984 ; Weaver, 1986 ; Danso, 1995).

B) Le niébé

En utilisant la méthode de la différence d'azote nous avons observé que le niébé fixait respectivement 143 et 15 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère en première et en deuxième. Ces quantités représentait 64 et 25% de l'azote total mobilisé par le niébé.

Avec la méthode de la dilution isotopique, nous avons observé que le niébé fixait 115 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère en première année. Ainsi le niébé prélevait 52 % de son azote total dans l'atmosphère, et 48% dans le sol (Tableau 10, page 56). En deuxième année, le niébé fixait 33 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère, représentant 56 % de ses besoins en azote. Selon la méthode de la dilution isotopique, le niébé a utilisé l'azote du sol pour combler 46 à 48% de ses besoins en azote. Il a utilisé l'azote de l'atmosphère pour couvrir 52 à 56 % des ses besoins en azote.

Les résultats obtenus par la méthode de la différence d'azote sont très variables et moins précis (24 à 64%) comparativement à ceux de la dilution isotopique (52 à 56%), montrant l'efficacité des méthodes isotopiques (Hauck et Weaver, 1986 ; Rennie, 1986 ; Hardarson et Danso, 1993). Khan et Yoshida (1994) ont également montré que la méthode de la différence d'azote peut surestimer la fixation symbiotique de l'azote d'environ 20% comparativement à la méthode de la dilution isotopique.

Les résultats obtenus par la méthode de la dilution isotopique sont assez proches de ceux obtenus par d'autres chercheurs qui ont utilisé la même méthode (Dommergues et Ganry, 1986; ; Hardarson *et al.*, 1987, Ankomah, 1995). Au Ghana, Ankomah (1995) a trouvé que le niébé peut fixer 42 à 76% de ses besoins en azote dans l'atmosphère. Dommergues et Ganry(1986) ont montré que le niébé fixait 49 à 101 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère et

que cette légumineuse peut combler 61 à 75% des ses besoins en azote par la fixation symbiotique. Senaratne *et al.* (1998) ont montré que le niébé mobilisait 50 à 75% de ses besoins en azote par la fixation symbiotique. Dans une revue des études du programme FAO/IAEA sur la fixation symbiotique de l'azote, Hardarson *et al.*(1987) ont montré que le niébé fixait environ 58% de ses besoins en azote dans l'atmosphère. En étudiant l'efficacité des symbioses Légumineuse/Rhizobium, Hardarson *et al.*(1987) ont classé le niébé parmi les légumineuses moyennement efficaces sur la fixation symbiotique de l'azote et dont le potentiel de fixation peut être amélioré par l'inoculation avec des souches de Rhizobium plus performantes.

3.1.2.2 Influence des fumures sur la fixation symbiotique de l'azote

Les effets des fumures sur la fixation symbiotique de l'azote ont été évalués sur les deux légumineuses avec la méthode de la dilution isotopique.

A) L'arachide

Les résultats sont présentés sur la Figure 3 (page 60). Il y a eu des pertes d'échantillons pendant les analyses du ^{15}N et le reste des données ne permettait pas de faire une analyse statistique des résultats. Les résultats montrent cependant que l'arachide fixait à peine 4 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère, représentant 20% de ses besoins en azote. Elle utilisait principalement l'azote du sol et de l'engrais pour combler 80% de ses besoins en azote. Cependant, la dolomie et le fumier ont augmenté les quantités d'azote fixé. L'arachide fixait 6 fois plus d'azote lorsque nous avons associé l'engrais minéral avec la dolomie, comparativement à l'engrais minéral seul. L'arachide fixait 12 fois plus d'azote lorsque nous avons associé le fumier avec l'engrais minéral. Le phosphate naturel a également augmenté la fixation symbiotique de l'azote par l'arachide. Par rapport à l'engrais minéral, l'arachide fixait 5 fois plus d'azote lorsque nous avons utilisé le phosphate naturel comme source de Phosphore.

B) Le niébé

Les résultats sont présentés sur la Figure 4 (page 61). Comme l'arachide, la fixation symbiotique de l'azote était relativement faible quand nous avons appliqué l'engrais minéral. Avec l'engrais minéral NPK, le niébé fixait à peine 20 kg N ha⁻¹ dans l'atmosphère, représentant 35% de ses besoins en azote. Ainsi, le niébé utilisait principalement l'azote du sol et de l'engrais pour combler 80% de ses besoins en azote. Cependant, la dolomie et le fumier ont augmenté très significativement les quantités d'azote fixé. Comparativement à l'engrais minéral seul, l'azote fixé par le niébé a augmenté de 120% lorsque nous avons associé l'engrais minéral avec la dolomie. Comme la dolomie, le fumier a également augmenté l'azote fixé par le niébé de 130%. Le phosphate naturel a aussi augmenté la fixation symbiotique de l'azote par le niébé. Par rapport à l'engrais minéral, l'azote fixé par le niébé a augmenté de 50% lorsque nous avons utilisé le phosphate naturel comme source de Phosphore.

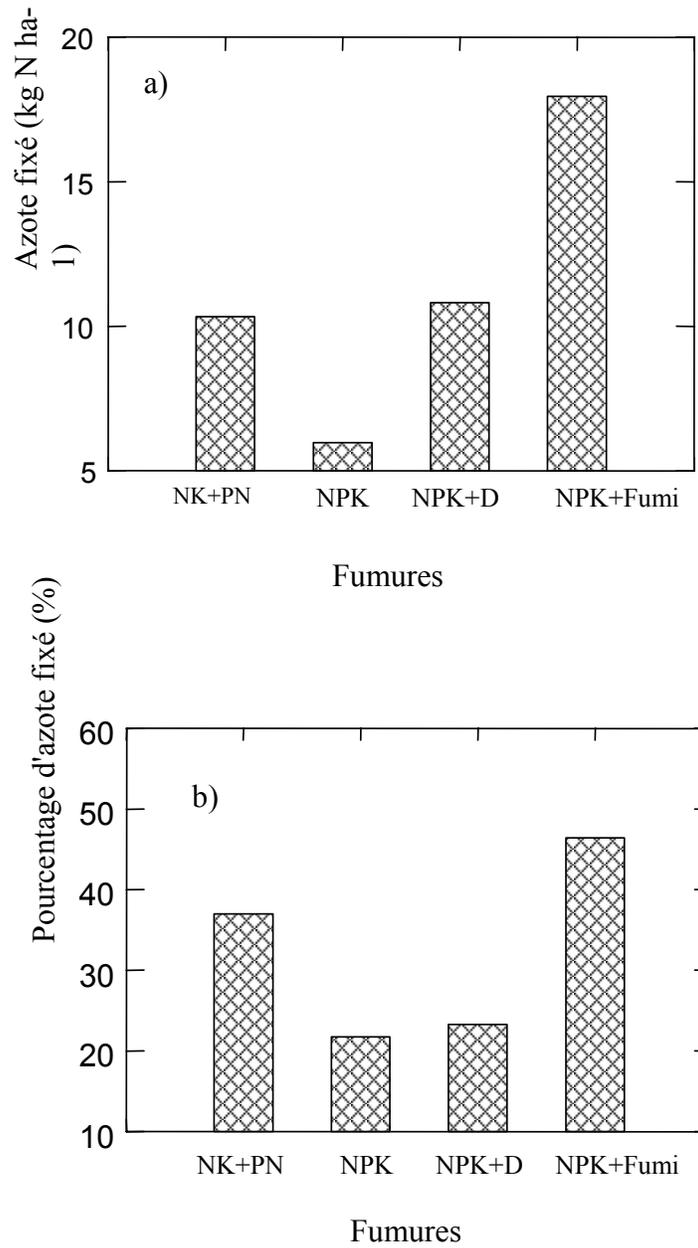


Figure 3 : Influence des fumures sur l'azote total (a) et le pourcentage d'azote fixé par l'arachide en 2001 à Farakô-Ba

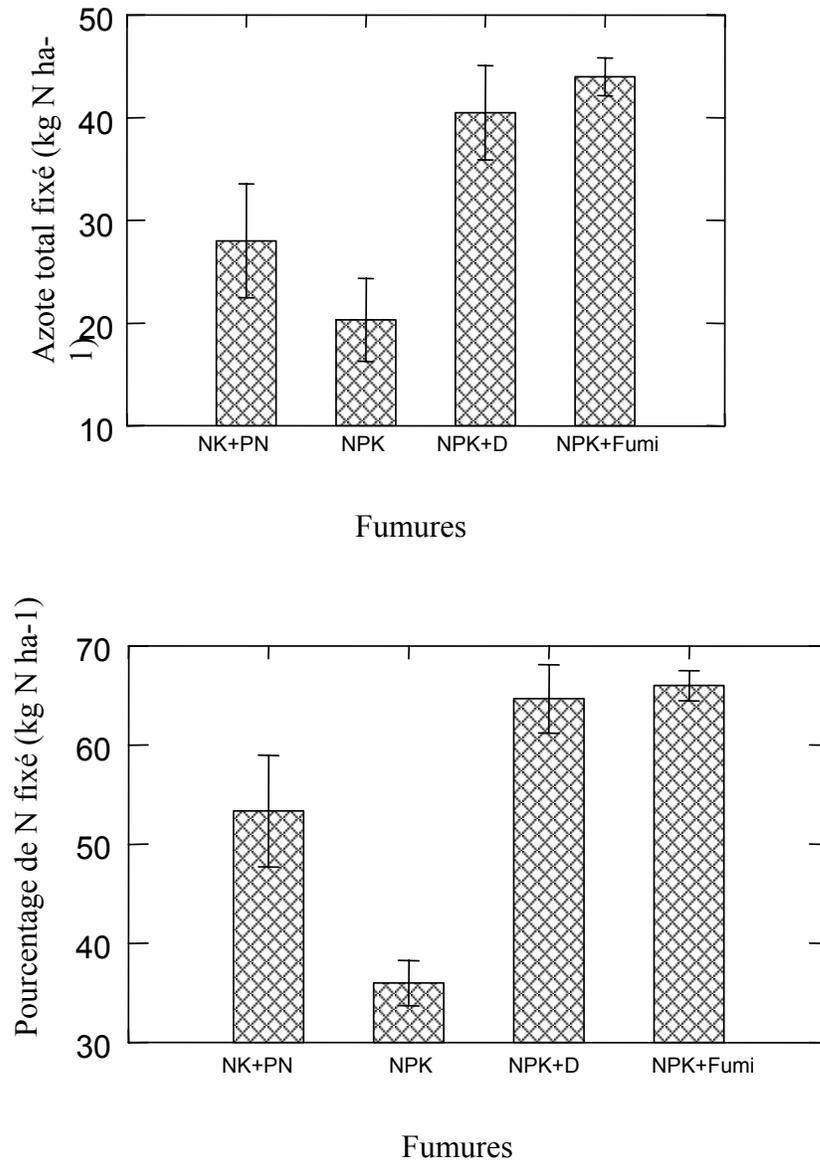


Figure 4 : Influence des fumures sur l'azote total (a) et le pourcentage d'azote (b) fixé par le niébé en 2001 à Farakô-Ba

C) Discussion

Les résultats montrent que les éléments nutritifs apportés par les fumures influencent les capacités des légumineuses à fixer l'azote de l'atmosphère. Ces résultats sont en conformité avec ceux obtenus sur les rendements en grains et en fanes des légumineuses. La croissance, la production de biomasse et les rendements sont les premiers indicateurs de l'état nutritionnel des plantes. Ce sont des indicateurs de la disponibilité des éléments nutritifs et leur utilisation par la plante. En fait, la disponibilité des éléments nutritifs et la capacité d'une légumineuse à fixer l'azote sont deux facteurs liés. Dans un sol, les rhizobia et la plante hôte disposent des éléments nutritifs qui leur sont nécessaires pour initier et entretenir l'activité symbiotique conduisant à la fixation de l'azote. Une déficience quelconque en éléments nutritifs peut diminuer le développement de la plante, des rhizobia et l'activité symbiotique, d'où une faible fixation de l'azote. À l'inverse dans les conditions favorables d'un sol riche, la croissance de la plante et des rhizobia sera meilleure, permettant une grande fixation de l'azote. Khan et Yoshida (1994) ont démontré la grande variabilité dans la fixation de l'azote par l'arachide, montrant que les teneurs en éléments nutritifs faisaient varier les pourcentages d'azote fixés dans l'atmosphère de 41 à 63%. Nos résultats montrent et confirment qu'une fertilisation adéquate des légumineuses est très nécessaire pour améliorer leurs capacités à fixer l'azote de l'atmosphère.

Le phosphore améliore en particulier la fixation symbiotique de l'azote et beaucoup de travaux indiquent que l'efficacité du P sur la fixation de l'azote réside dans sa capacité à augmenter la nodulation et l'activité de la symbiose (Olofintoye, 1986 ; Bationo *et al.*, 1995^a ; Giller *et al.*, 1995). Mandimba et Djondo (1996) ont montré que le phosphore pouvait augmenter la nodulation chez l'arachide de 57 à 176%. Olofintoye (1986) a trouvé que l'application des engrais phosphatés augmentait à la fois la nodulation et l'absorption des autres éléments nutritifs par le niébé. Giller *et al.* (1995) ont montré qu'avec une fertilisation adéquate en éléments P et K associée, le chaulage augmentait la fixation symbiotique, permettant à l'arachide et au niébé de fixer respectivement 65 à 85% de leurs besoins en azote dans l'atmosphère.

Les effets bénéfiques de la dolomie, du fumier et du phosphate naturel sont dus à leur double rôle sur la fertilité du sol. Ils améliorent l'activité symbiotique en apportant également des éléments nutritifs pour les rhizobia et les légumineuses. Leurs effets remarquables sur la fixation symbiotique de l'azote méritent une attention particulière. En plus des éléments nutritifs apportés, leur rôle sur la neutralisation de l'acidité contribue à expliquer leur efficacité sur la fixation symbiotique de l'azote (Giller *et al.*, 1995).

L'efficacité de la dolomie sur les rendements et la fixation de l'azote semble montrer que le sol était très pauvre en Ca et Mg. Bationo *et al.* (1991^a) et Bationo et Ntare, 2000 ont fait les mêmes observations et ont conclu que le P, Ca, Mg et Mo sont les principaux éléments nutritifs limitant la productivité des légumineuses dans la zone tropicale semi-aride de l'Afrique de l'Ouest. Singh *et al.* (1985) ont observé que le Ca apporté par le chaulage, stimulait l'activité symbiotique. L'efficacité du chaulage sur l'amélioration de la nodulation de l'arachide a été également observée par d'autres chercheurs (Dennis, 1977; Wey et Obaton, 1978; Singh *et al.*, 1985 ; Giller *et al.*, 1995). Reddy *et al.* (1998) ont observé que le chaulage augmentait fortement la fixation symbiotique de l'azote par l'arachide. L'efficacité du fumier peut s'expliquer par son double rôle sur l'apport d'éléments nutritifs, l'augmentation de la disponibilité du P (Singh et Jones, 1976; Gerke, 1993) et la neutralisation de l'acidité du sol.

L'efficacité du phosphate naturel sur la fixation symbiotique peut s'expliquer par le P et Ca apporté. Si à dose égale de phosphore, le phosphate naturel augmente significativement la fixation symbiotique de l'azote par rapport au phosphate soluble, cela confirme l'important rôle du calcium apporté par le phosphate naturel dans la symbiose Légumineuse/Rhizobium déjà observé par Singh *et al.* (1985) et l'efficacité des légumineuses à utiliser le P des phosphate peu solubles (Ae *et al.*, 2001).

3.2 Influence des légumineuses sur les rendements des cultures subséquentes

Les résultats sur la fixation symbiotique de l'azote nous ont montré que l'arachide et le niébé fixaient des quantités plus ou moins importantes d'azote en fonction des fumures utilisées. Entre les deux légumineuses, le niébé a une plus grande capacité de fixation de l'azote. Dans les rotations culturales utilisant ces légumineuses, les cultures succédant aux légumineuses devraient bénéficier en partie de cet azote par le recyclage des résidus des légumineuses. À long terme, une rotation Légumineuses-Céréale devrait produire plus de rendements en céréale comparativement à une monoculture de céréale. Autrement dit, les effets 'azote' des légumineuses doivent favoriser les rotations comportant des légumineuses, entraînant des augmentations des rendements des cultures non fixatrices d'azote. C'est la deuxième hypothèse de cette recherche.

Pour vérifier cette hypothèse, nous présentons d'abord les résultats sur les effets des précédents légumineuses sur les rendements du sorgho succédant directement aux légumineuses, avant d'examiner les effets à long terme des rotations incluant les légumineuses sur les rendements des cultures non fixatrices d'azote.

3.2.1 Influence des légumineuses sur les rendements du sorgho subséquent

Les résultats sont présentés sur le Tableau 11 (page 66). À la première année d'expérimentation (2000), toutes les cultures avaient le même précédent jachère sur laquelle l'expérimentation a été installée. Nous avons évalué seulement les effets des fumures sur les trois cultures. Les effets des précédents ont été mesurés à la deuxième année (2001) après la rotation des cultures sur les parcelles. Ainsi, les effets des fumures ont été évalués sur deux années.

3.2.1.1 Effets des fumures

Les fumures ont influencé significativement les rendements du sorgho pendant les deux années. Les effets des fumures étaient plus marqués en deuxième année. Comparativement au témoin non fertilisé, les fumures augmentaient les rendements en grains du sorgho de 30 à 61% et de 30 à 117% en première et deuxième année respectivement. Elles augmentaient les rendements en paille de 6 à 52% et de 13 à 78% en première et deuxième année respectivement.

A) Première année

Le sorgho produisait de bons rendements en première année dans les parcelles témoins non fertilisé (Tableau 11, page 66). Cela est probablement dû à l'effet de la jachère, expliquant le réflexe des producteurs à utiliser cette pratique de la jachère pour restaurer la fertilité des sols (Sédogo, 1981; Pichot et al 1981; Pieri, 1989).

La fumure minérale complète NPK a augmenté significativement les rendements de 37% par rapport au témoin non fertilisé. La fertilisation a été encore plus efficace lorsque nous avons associé le fumier avec l'engrais NPK, augmentant les rendements en grains du sorgho de 61% comparativement au témoin non fertilisé. L'apport du fumier a été bénéfique, entraînant 20% d'augmentation de rendements comparativement à la fumure NPK seul. Contrairement au fumier, la dolomie n'a pas augmenté significativement les rendements en première année.

Comme source de phosphore, le phosphate naturel a été aussi efficace que le phosphate soluble et il n'y a pas eu de différence statistiquement significative entre la fumure minérale NPK et la fumure PK+Burkinaphosphate.

Tableau 11 : Influence des fumures sur les rendements en grains et en paille du sorgho à Farako-Bâ

Année	Fumures	Grains	Indice	Pailles	Indice
		Kg ha ⁻¹	%	Kg ha ⁻¹	%
Première Année (2000)	NPK recommandé	1487 ^b	136	5428 ^b	133
	NPK+Dolomie	1493 ^b	137	5147 ^{bc}	126
	NPK+Fumier	1779 ^a	161	6189 ^a	152
	NK+BP	1416 ^b	130	4325 ^d	106
	PK	1096 ^c	100	3951 ^{ef}	97
	Témoin	1092 ^c	100	4085 ^{de}	100
	Bloc	***		**	
Fumure (F)	***		***		
Deuxième Année (2001)	NPK recommandé	1553 ^{bc}	180	6221 ^c	154
	NPK+Dolomie	1627 ^b	188	6654 ^b	164
	NPK+Fumier	1876 ^a	217	7214 ^a	178
	NK+BP	1121 ^c	130	4590 ^e	113
	PK	1387 ^d	160	5902 ^{cd}	146
	Témoin	864 ^f	100	4049 ^f	100
	Bloc	***		***	
Précédent (P)	***		***		
Fumure (F)	***		***		
PxF	ns		ns		

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00 ; ns : Non significatif ($p > 0.05$)
 Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

B) Deuxième année

La fumure minérale complète NPK a augmenté significativement les rendements en grains de 80% par rapport au témoin non fertilisé (Tableau 11, page 66). La fertilisation a été encore plus efficace lorsque nous avons associé le fumier avec l'engrais NPK. La fumure organo minérale produisait deux fois plus de rendements en grains par rapport au témoin non fertilisé. L'apport du fumier a été encore plus bénéfique en deuxième année, entraînant 21% d'augmentation de rendements comparativement à la fumure NPK seul.

Contrairement à l'année précédente, la dolomie a eu un effet significatif sur les rendements en paille. La fumure minérale utilisant le burkina-phosphate (NK+BP) comme source de phosphore a donné des rendements moins élevés que l'engrais minéral NPK recommandé, dû à la faible solubilité du phosphate naturel, montrant l'importance du phosphore sur les rendements (Bationo et Mokwunye 1991, Sédogo *et al.*, 1991; Bado *et al.*, 1997).

3.2.1.2 Effets des précédents légumineuses

Les précédents arachide et niébé ont influencé significativement les rendements du sorgho (Tableau 11, page 66; et Figure 5, page 69). Il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs (fumures et précédent), ce qui indique que les précédents ont influencé de la même façon les rendements quelle que soit la fumure utilisée. Autrement dit, l'absence d'interaction entre les deux facteurs indique que les fumures ont également augmenté de la même façon les rendements, quelque soit le précédent cultural (Tableau 11, page 66).

Avec la monoculture de sorgho sur les deux années successives (2000 et 2001), les rendements en grains et en paille ont été très faibles en deuxième année (Figure 5, page 69). Le sorgho produisait à peine 1 tonne ha⁻¹ de rendements en grains. Par contre lorsque le sorgho était précédé par l'arachide, le niébé ou même le niébé non fixateur d'azote, les rendements en grains augmentaient significativement par rapport à la monoculture. Les

rendements en grains et en paille du sorgho ont augmenté respectivement de 70 et 100% lorsqu'il est précédé par l'arachide. Par rapport à la monoculture, le précédent niébé permettait de doubler les rendements en grains du sorgho. Le précédent niébé avait un effet encore plus marqué sur les rendements en paille. Le précédent niébé augmentait les rendements en paille du sorgho de 139% par rapport à la monoculture.

L'efficacité du niébé non fixateur sur les rendements du sorgho est dû probablement à l'effet bénéfique de la rotation comparativement à la monoculture de sorgho mais aussi et surtout à l'azote apporté par les résidus de récolte. Les résultats précédents ont montré que le niébé non fixateur mobilisait autant d'azote que l'arachide. L'azote recyclé par les résidus du niébé non fixateur peut bénéficier au sorgho, expliquant les rendements élevés.

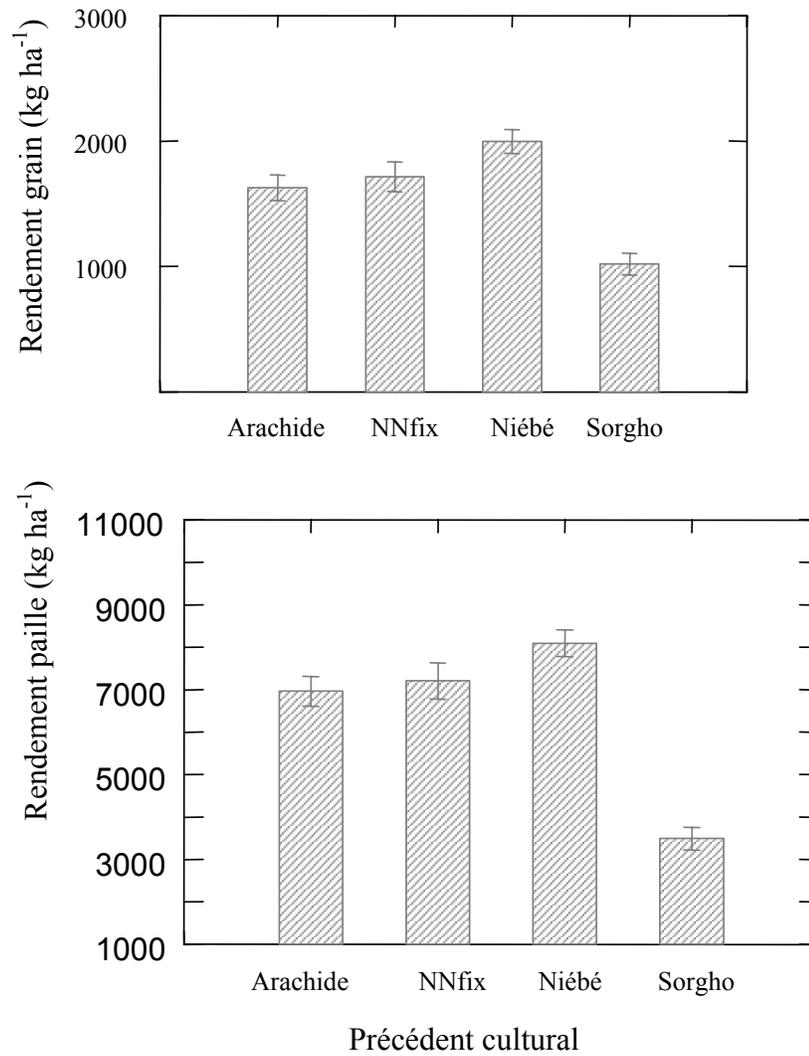


Figure 5 : Influence des précédents sorgho, niébé et arachide sur les rendements en grain (a) et en paille (b) du sorgho à Farakô-Ba en 2001.

NNf : Niébé non fixateur d'azote

3.2.2 Effets à long terme des rotations sur les rendements des cultures

Les résultats sur l'étude des précédents culturaux ont montré que les légumineuses augmentaient les rendements du sorgho subséquent dès la deuxième année de culture. Les effets des légumineuses peuvent encore être mieux appréciés sur le long terme. Nous avons utilisé deux expérimentations de longue durée pour évaluer les effets à long terme des rotations comportant des légumineuses sur les rendements des cultures non fixatrices d'azote (le sorgho et le cotonnier). Les expérimentations ont été conduites pendant 7 et 9 années sur les sites de Kouaré et Farakô-Ba respectivement.

Les résultats ont été présentés par culture. Pour chaque culture, nous avons procédé d'abord à une analyse des données annuelles avec les deux variables : rotation et fumure. Nous avons effectué ensuite une analyse combinée des résultats de toutes les années en intégrant l'année comme troisième variable afin d'évaluer les effets globaux des rotations et des fumures pendant la période de temps considérée.

3.2.2 1 Site de Kouaré

Les effets des fumures sur les rendements du sorgho sont présentés dans le Tableau 12 (page 74). Le Tableau 13 (page 75) présente les résultats de l'analyse de la variance des effets des fumures et des rotations sur les rendements.

L'analyse de variance des effets annuels a montré que les fumures et les rotations culturales ont influencé significativement les rendements en grains et en paille du sorgho. Pendant les 7 années, les interactions entre les deux facteurs (rotation et fumure) n'étaient pas statistiquement significative, indiquant que les rotations influencent de la même façon les rendements quelque soit la fumure. Inversement, chaque rotation influence chaque année les rendements de la même façon et ce, quelle que soit la fumure appliquée.

A) Les fumures

Les parcelles témoins non fertilisées produisaient les plus faibles rendements grains et paille (Tableau 12, page 74). Les rendements en grains variaient entre 16 et 530 kg ha⁻¹. Quelle que soit la fumure utilisée, l'application des engrais entraînait une augmentation systématique des rendements grains et paille pendant toute la durée de l'expérimentation.

En absence d'azote et en appliquant uniquement le phosphore, le potassium et les amendements organiques (PK+Fumier, PK+Résidus de récolte) les rendements augmentaient significativement par rapport à ceux des parcelles témoins non fertilisées. Mais les rendements demeurent faibles comparativement à ceux obtenus avec la fumure minérale complète NPK, indiquant que l'azote apporté par les amendements organiques ne suffisait pas pour combler les besoins en azote du sorgho. L'engrais minéral NPK augmentait significativement les rendements. Mais il devenait encore plus efficace quand il était associé avec la dolomie.

L'analyse pluriannuelle des résultats des 7 années a montré également les effets très significatifs des fumures sur les rendements (Tableau 14, page 77). Le sorgho produisait un rendement grain moyen de 200 kg ha⁻¹ environ et l'utilisation des engrais permettait de tripler ou de quadrupler les rendements. Lorsqu'on n'utilisait pas de l'azote dans la fumure (PK + Fumier et PK + Résidus de récolte), les rendements étaient faibles comparativement à la fumure minérale complète NPK, confirmant le rôle prépondérant de l'azote dans la fertilisation du sorgho.

Comparativement aux parcelles témoins non fertilisées, l'engrais minéral NPK a permis de tripler les rendements moyens. L'application de la dolomie avec l'engrais minéral permettait d'augmenter les rendements grains moyens de 34 et 264% comparativement à l'engrais NPK et au témoin respectivement.

B) Les rotations culturales

Pendant les 6 années au cours des quelles nous avons évalué les effets des rotations, la culture continue de sorgho produisait toujours les plus faibles rendements en grain (Tableau 13, page 75). À l'inverse, les plus hauts rendements étaient obtenus lorsque le niébé précédait le sorgho (niébé-sorgho). Le précédent jachère était moins efficace que le précédent niébé. Pendant 5 années sur 6, les rendements de la rotation Niébé-Sorgho étaient significativement supérieurs à ceux de la rotation Jachère-Sorgho.

Les effets des rotations augmentaient avec le temps. Comparativement à la monoculture, la rotation Jachère-Sorgho permettait d'augmenter les rendements du sorgho de 80 et 87% en 1995 et 2000 respectivement (Tableau 13, page 75). Dans la rotation niébé-sorgho, les rendements du sorgho augmentaient également de 125 et 142% en 1995 et 2000 respectivement. Durant les 6 années, les rotations augmentaient également les rendements en paille comparativement à la monoculture. Les plus hauts rendements en paille étaient obtenus avec la rotation Jachère-Sorgho.

Les résultats de l'analyse pluriannuelle sont présentés sur le Tableau 14 (page, 77). Outre les deux premiers facteurs (rotation et fumure), le facteur 'année' a également influencé les rendements du sorgho. Les fortes variations de la pluviométrie au cours des 6 années peuvent expliquer les variations de rendements, justifiant l'effet significatif du facteur 'année'. Dans les conditions de l'agriculture pluviale où les expérimentations ont été conduites, la pluviométrie de la saison et la fréquence des pluies d'une saison à l'autre, influencent inévitablement la croissance des plantes et leur réponses aux fumures et aux rotations culturales.

L'analyse de la variance a confirmé effectivement qu'il existait une interaction entre l'effet 'rotation' et l'effet 'année' d'une part, et entre l'effet 'fumure' et l'effet 'année' d'autre part (Tableau 13, page 75). L'interaction Rotation-Année indique que les effets des rotations variaient selon les années. L'interaction Fumure-Année indique que les effets des fumures variaient également selon les années.

En effet, la disponibilité des éléments nutritifs du sol et des engrais est fonction par exemple de l'humidité du sol et des régimes hydriques dans les parcelles. Par le ruissellement des eaux dû aux violents orages observés souvent au mois d'août, il peut y avoir des pertes éventuelles d'éléments nutritifs du sol et des engrais nouvellement appliqués. Les quantités d'eau, les fréquences et l'intensité des pluies sont des facteurs variables d'une année à l'autre et susceptibles d'influencer la croissance des cultures et l'utilisation des éléments nutritifs. Ces différents facteurs spécifiques à chaque saison peuvent expliquer les variations des réponses aux rotations et aux fumures d'une année à l'autre.

Tableau 12 : Effets des fumures sur les rendements du sorgho pendant 7 années à Kouaré

		Années						
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Graines Kg ha ⁻¹	NP+Résidus	576 ^c	815 ^{cd}	338 ^d	684 ^{ab}	84 ^{cd}	550 ^{bc}	697 ^b
	NPK recommandé	812 ^a	nd	430 ^{bc}	635 ^{a^{bc}}	130 ^{ab}	707 ^a	518 ^{cd}
	NPK+Dolomie	717 ^{ab}	1187 ^a	455 ^{ab}	705 ^a	143 ^a	566 ^b	831 ^a
	PK+Fumier	477 ^{de}	1093 ^{ab}	465 ^a	587 ^d	100 ^c	503 ^{cd}	530 ^c
	PK+Résidus	510 ^{cd}	909 ^{bc}	269 ^e	498 ^e	37 ^e	347 ^e	304 ^e
	Témoin	232 ^f	530 ^{de}	76 ^f	202 ^f	16 ^{ef}	157 ^f	148 ^f
Paille Kg ha ⁻¹	NP+Résidus	2611 ^{ab}	dm	dm	dm	2242 ^c	1931 ^c	3548 ^b
	NPK recommandé	2930 ^a	dm	dm	dm	2904 ^{ab}	1555 ^a	2338 ^d
	NPK+Dolomie	2346 ^{bc}	6981 ^a	4597 ^a	4496 ^a	3346 ^a	2256 ^b	4228 ^a
	PK+Fumier	1370 ^{de}	5997 ^b	4521 ^{ab}	3313 ^b	2901 ^{ab}	1625 ^d	3054 ^c
	PK+Résidus	1635 ^d	5212 ^c	3942 ^{bc}	2615 ^{bc}	1620 ^d	1189 ^e	2089 ^{de}
	Témoin	981 ^f	3480 ^d	1772 ^d	1454 ^d	625 ^e	591 ^f	913 ^f

Les chiffres affectés d'une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher
dm : Données manquantes

Tableau 13 : Effets des rotations sur les rendements du sorgho pendant 6 années à Kouaré

	Rotations	Années					
		1995	1996	1997	1998	1999	2000
Grain Kg ha ⁻¹	Jachère-Sorgho	983 ^b	428 ^{ab}	566 ^b	82 ^b	538 ^a ^b	542 ^b
	Niébé-Sorgho	1227 ^a	497 ^a	668 ^a	114 ^a	586 ^a	702 ^a
	Sorgho-Sorgho	546 ^c	158 ^c	312 ^c	40 ^c	336 ^c	290 ^c
	Bloc	ns	***	***	**	**	*
	Rotation (R)	***	***	***	**	***	***
	Fumure (F)	***	***	***	***	***	***
	RxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Paille Kg ha ⁻¹	Jachère-Sorgho	5653 ^b	4441 ^b	3183 ^a	2674 ^{ab}	2686 ^{ab}	3768 ^b
	Niébé-Sorgho	7693 ^a	5176 ^a	3127 ^{ab}	2753 ^a	2801 ^a	4759 ^a
	Sorgho-Sorgho	4619 ^c	3197 ^c	2459 ^c	1678 ^c	1730 ^c	2862 ^c
	Bloc	***	*	**	*	***	nd
	Rotation (R)	***	***	ns	***	***	***
	Fumure (F)	***	***	***	***	***	***
	RxF	nd	nd	nd	nd	nd	nd

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

Les résultats de l'analyse pluriannuelle synthétisent et confirment ceux des analyses annuelles. La culture continue de sorgho produisait les plus faibles rendements moyen en sorgho grain pendant les 6 années (Tableau 14, page 77). La monoculture produisait en moyenne 166 kg ha⁻¹ de grain par an. Les plus hauts rendements ont été obtenus lorsque le sorgho était cultivé en rotation avec le niébé. Comparativement à la culture continue, la rotation Niébé-Sorgho permettait de quadrupler les rendements annuels moyens du sorgho. La rotation Jachère-Sorgho était également plus efficace que la monoculture de sorgho. Elle permettait de produire 3 fois plus de rendement grain en moyenne par an, comparativement à la monoculture de sorgho.

Tableau 14 : Analyses pluriannuelles des effets des fumures et des rotations sur les rendements en grains du sorgho pendant 6 années (1995-2000) à Kouaré

	Kg ha ⁻¹	Indice (%)
Fumures		
NPK+Dolomie	637 ^a	364
NP+Résidus	592 ^b	338
PK+Fumier	559 ^{bc}	319
NPK	475 ^d	271
PK+Résidus	412 ^e	235
Témoin sans engrais	175 ^f	100
Rotations		
Niébé-Sorgho	733 ^a	442
Jachère-Sorgho	526 ^b	317
Sorgho-Sorgho	166 ^c	100
Bloc	***	
Rotation (R)	**	
Fumure (F)	***	
Année (A)	***	
RxF	ns	
RxA	**	
FxA	**	
RxFxA	ns	

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00 ; ns : Non significatif ($p > 0.05$)
 Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

3.2.2.2 Site de Farako-Bâ

Les effets des rotation avec l'arachide étaient comparés sur deux cultures non fixatrices d'azote à Farakô-Ba, le sorgho et le cotonnier.

A) Le sorgho

Les résultats des analyses annuelles des effets des rotations sur les rendements sont présentés dans le Tableau 15 (page, 80). Le Tableau 16 (page 81) présente les résultats des analyses des effets des fumures sur les rendements en grains et en paille du sorgho. Les résultats sont très semblables à ceux de Kouaré. Les fumures et les rotations culturales ont influencé significativement les rendements du sorgho et il n'y a pas d'interaction significative entre les deux facteurs (Tableau 16, page 81). L'analyse pluriannuelle a montré également que le facteur «année» influençait significativement les rendements et qu'il existait une interaction significative entre les facteurs «année» et «rotation» d'une part, et entre les facteurs «année» et «fumure» d'autre part (Tableau 17, page 83). Ces différentes interactions indiquent que malgré la pluviométrie relativement favorable de la zone guinéenne, il y a une influence significative des saisons sur les réponses aux rotations et aux fumures .

Mais par rapport aux résultats de Kouaré (Tableau 12, page 74), les rendements du sorgho étaient très élevés à Farako-Bâ (Tableau 15, page 80), surtout en première année de culture (1993). En première année de culture, le sorgho produisait entre 1,8 à 2,8 tonnes de rendements en grains par hectare. La pluviométrie relativement favorable de la zone et l'effet de la jachère expliquent les rendements élevés du sorgho durant la première année.

Effets des fumures

Comme à Farakô-Ba, le sorgho produisait des faibles rendements dans les parcelles témoins non fertilisées et l'application des engrais augmentait les rendements de 34 à 238%. L'engrais minéral augmentait les rendements du sorgho de 97% par rapport au témoin non fertilisé. Comme à Kouaré, l'engrais minéral était encore plus efficace quand

il était appliqué avec la dolomie. L'application de la dolomie avec l'engrais minéral permettait d'augmenter les rendements annuels en grains de 20 et 38% comparativement à l'engrais NPK et au témoin respectivement.

En absence d'azote et en appliquant uniquement le phosphore, le potassium et les amendements organiques moins décomposés (PK+Résidus de récolte), les rendements augmentaient significativement par rapport à ceux des parcelles témoins non fertilisées. Mais les rendements demeuraient faibles comparativement à ceux obtenus avec la fumure minérale complète NPK recommandé. Par contre, l'application des amendements organiques plus décomposés (PK+Compost et PK+Fumier) permettait d'augmenter les rendements en grains. Même sans l'apport de l'azote, le compost et le fumier permettaient d'obtenir des rendements aussi élevés que la fumure minérale complète NPK.

La différence entre ces deux types d'amendements réside dans la qualité de la matière organique apportée au sol. Les amendements à C/N élevé comme les résidus de récolte sont pauvres en azote et entraînent probablement une immobilisation plus accentuée de l'azote en début de cycle contrairement au fumier et au compost qui assurent une meilleure disponibilité de l'azote pour le sorgho (Stevenson, 1984).

Tableau 15 : Influence des fumures sur les rendements en grains du sorgho (kg ha⁻¹) pendant 9 années (1993-2001) à Farakô-Ba

	Fumures	Années								
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Grain Kg ha ⁻¹	NPK recommandé	2445 ^{bc}	1869 ^{bc}	1616 ^{ab}	1259 ^{cde}	686 ^c	403 ^{ef}	377 ^f	1249 ^{bcd}	1377 ^{bcd}
	NPK+Dolomie	2500 ^b	2044 ^a	1605 ^a	1474 ^a	818 ^a	906 ^a	684 ^a	1263 ^b	1423 ^{bc}
	NPK+Résidus	2809 ^a	1962 ^{abc}	1629 ^{ab}	1411 ^{ab}	685 ^{cd}	617 ^{bc}	469 ^{de}	1254 ^{bc}	1431 ^b
	PK	2046 ^e	1615 ^d	1186 ^e	891 ^{fg}	473 ^f	350 ^{efg}	259 ^{gh}	632 ^g	956 ^h
	PK+Compost	2430 ^{bcd}	1981 ^{abc}	1534 ^{bc}	1265 ^{cd}	625 ^{cde}	613 ^{bcd}	522 ^d	1229 ^{bcd}	1237 ^e
	PK+Fumier	2529 ^{ab}	2032 ^{ab}	1682 ^a	1317 ^c	791 ^{ab}	724 ^b	631 ^{bc}	1378 ^a	1734 ^a
	PK+Résidus	2263 ^{cd}	1556 ^{de}	1398 ^d	985 ^f	588 ^{de}	432 ^e	282 ^g	981 ^f	1078 ^g
	Témoin	1782 ^f	1192 ^f	857 ^f	587 ^h	334 ^g	318 ^h	144 ⁱ	596 ^h	574 ⁱ
Paille Kg ha ⁻¹	NPK recommandé	6347 ^c	8000 ^{bc}	6151 ^e	dm	dm	1432 ^e	1778 ^e	5534 ^c	1893 ^{cd}
	NPK+Dolomie	6202 ^{cd}	8360 ^a	6723 ^{cd}	dm	dm	2736 ^a	2905 ^a	6364 ^{ab}	2044 ^b
	NPK+Résidus	6964 ^a	7947 ^{abc}	6883 ^{de}	dm	dm	1742 ^{cd}	2177 ^{cd}	5461 ^{cd}	1971 ^{bc}
	PK	5462 ^{fg}	7114 ^d	5435 ^f	dm	dm	1213 ^{fg}	1225 ^{fg}	2739 ^g	1326 ^f
	PK+Compost	5959 ^{cde}	8074 ^{abc}	6826 ^b	dm	dm	1900 ^c	2372 ^c	5257 ^{cde}	1712 ^d
	PK+Fumier	6869 ^{ab}	8584 ^{ab}	7433 ^a	dm	dm	2268 ^b	2861 ^{ab}	6457 ^a	2432 ^a
	PK+Résidus	5864 ^{def}	7082 ^{de}	6050 ^{ef}	dm	dm	1294 ^f	1453 ^f	4073 ^f	1478 ^e
	Témoin	4413 ^h	5410 ^f	4257 ^g	dm	dm	1188 ^{fgh}	773 ^h	2690 ^{gh}	828 ^g

Les chiffres affectés d'une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher
 dm : données manquantes

Tableau 16 : Influence des rotations sur les rendements du sorgho (kg ha⁻¹) pendant 8 années (1995-2000) à Farako-Bâ

		Années							
Rotations		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Grain Kg ha-1	Coton-Ara-Sorgh	2138 ^{ab}	1566 ^{ab}	1466 ^a	716 ^b	642 ^{abc}	553 ^a	1346 ^a	1379 ^{bc}
	Ara-Coton –Sorgho	2188 ^a	1537 ^{bc}	1130 ^c	925 ^a	688 ^{ab}	425 ^c	1231 ^{ab}	1533 ^a
	Jachère-Sorgho	1482 ^c	1422 ^d	1203 ^{bc}	582 ^c	718 ^a	504 ^{ab}	1081 ^c	1266 ^d
	Sorgho-Sorgho	1316 ^d	1229 ^e	795 ^d	279 ^d	134 ^d	202 ^d	632 ^d	541 ^e
	Bloc	**	**	***	**	**	**	**	***
	Rotation	-	**	***	**	**	**	**	***
	Fumure	**	**	***	**	**	**	**	***
	RXF	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Paille Kg ha-1	Coton-Ara-Sorgh	9334 ^b	7760 ^a	dm	dm	2134 ^{ab}	2812 ^a	5876 ^{ab}	7589 ^a
	Ara-Coton –Sorgh	9958 ^a	6419 ^b	dm	dm	1999 ^{abc}	1949 ^{bc}	5967 ^a	7220 ^{ab}
	Jachère-Sorgho	5937 ^c	5937 ^c	dm	dm	2176 ^a	2165 ^b	4869 ^c	5626 ^d
	Sorgho-Sorgho	5106 ^d	4514 ^e	dm	dm	578 ^d	846 ^d	2576 ^d	2441 ^e
	Bloc	***	ns	dm	dm	***	***	***	***
	Rotation	***	***	dm	dm	***	***	***	***
	Fumure	***	***	dm	dm	***	***	***	***
	RXF	ns	ns	dm	dm	*	ns	ns	*

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres affectés d'une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

dm : données manquantes

Effets des rotations

Comme à Kouaré, la culture continue de sorgho produisait les plus faibles rendements en grains (Tableau 16, page 83). Les rotations comportant de l'arachide (Coton-Arachide-Sorgho et Arachide-Coton-Sorgho) produisaient les plus hauts rendements. Les effets des rotations étaient de plus en plus marqués avec le temps. Comparativement à la monoculture, les rendements du sorgho augmentaient de 62% en 1994 quand l'arachide précédait directement le sorgho (Coton-Arachide-Sorgho) (Tableau 16, page 81). Par contre en 2001, les rendements augmentaient de 155% quand l'arachide précédait directement le sorgho.

Durant les 7 années, les rendements en paille ont été également faibles dans la culture continue de sorgho (Tableau 17, page 83). La monoculture produisait en moyenne 550 kg ha-1 de grains. Par contre, on obtenait les plus hauts rendements en paille lorsque l'arachide était présente dans la rotation (Coton-Arachide-Sorgho et Arachide-Coton-Sorgho).

Tableau 17 : Analyse pluriannuelle des effets des fumures et des rotations sur les rendements en grains du sorgho (kg ha^{-1}) pendant 9 (1993-2001) année à Farako-Bâ

	----- Sorgho grain -----	
	Kg ha^{-1}	Indice (%)
Fumures		
NPK +Dolomie	1125 ^a	238
PK+Fumier	1087 ^{ab}	230
NPK+Résidus de récolte	1011 ^c	214
PK+Compost	965 ^{cd}	204
NPK recommandé	932 ^{de}	197
PK+Résidus de récolte	778 ^f	164
PK	632 ^g	134
Témoin sans engrais	473 ^h	100
Rotations		
Coton-Arachide-Sorgho	1021 ^a	187
Arachide-Coton -Sorgho	971 ^{ab}	177
Arachide-Arachide		
Jachère-Sorgho	912 ^{bc}	167
Sorgho-Sorgho	547 ^d	100
Bloc	***	
Rotation (R)	***	
Fumure (F)	***	
Année (A)	***	
RxF	ns	
RxA	***	
FxA	***	
RxFxA	ns	

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

B) Le cotonnier

Le (Tableau 18, page 86) présente les résultats des analyses pluriannuelles des effets des fumures et des rotations sur les rendements du cotonnier. Les résultats sont très semblables à ceux du sorgho. Les fumures et les rotations culturales ont influencé significativement les rendements du cotonnier et il n'y a pas d'interaction significative entre les deux facteurs. Le facteur «année» influençait significativement les rendements et il existait une interaction significative entre les facteurs «année» et «rotation» d'une part, et entre les facteurs «année» et «fumure» d'autre part.

Les fumures

La fumure exclusivement minérale augmentait significativement les rendements en coton par rapport au témoin non fertilisé ; mais les meilleurs rendements ont été obtenus quand la dolomie était associée à l'engrais minéral. Les fumures organo-minérales (PK associé au compost, fumier ou au résidus de culture) augmentaient également les rendements. La dolomie était particulière plus efficace sur le cotonnier. L'engrais minéral NPK augmentait les rendements moyens annuels de 50%. Mais lorsque l'engrais minéral était associé avec la dolomie, les rendements augmentaient de 138% par rapport au témoin non fertilisé. Par rapport à l'engrais minéral seul, la fumure apportant l'engrais minéral associé à la dolomie, augmentait les rendements de 30%.

Les rotations culturales

Il existe seulement deux rotations culturales comportant à la fois le cotonnier et l'arachide (Coton-Arachide-Sorgho et Arachide-Coton-Sorgho). La seule différence entre ces deux rotations est la place de l'arachide dans la séquence.

L'analyse pluriannuelle a montré que lorsque l'arachide précédait directement le cotonnier dans la rotation (Sorgho-Arachide-Coton), les rendements moyens du cotonnier étaient significativement supérieurs à ceux du précédent sorgho (Tableau 18, page 86).

Pourtant, les analyses annuelles des données avaient montré que les rotations n'avaient pas d'effets sur les rendements du cotonnier. Cette contradiction entre les données annuelles et l'analyse pluriannuelle s'explique par la quantités de données traitées dans les deux situation. Dans l'analyse pluriannuelle utilisant les résultats des 7 années, le nombre de données prises en compte dans l'analyse est 7 fois plus élevé que dans l'analyse annuelle. Par l'importance des données utilisées, et la prise en compte du facteur «année», l'analyse pluriannuelle peut mettre en évidence des différences que l'analyse annuelle ne peut déceler.

Tableau 18 : Analyse pluriannuelle des effets des fumures et des rotations sur les rendements du cotonnier (kg ha^{-1}) pendant 9 années (1993-2001) à Farakô-Ba.

	Kg ha^{-1}	Indice (%)
Fumures		
NPK +Dolomie	1287 ^a	196
PK+Fumier	1180 ^b	180
NPK+Résidus de récolte	1087 ^c	166
PK+Compost	1035 ^{cd}	158
NPK recommandé	986 ^{cde}	150
PK+Résidus de récolte	857 ^f	131
PK	773 ^g	118
Témoin sans engrais	656 ^h	100
Rotations		
Coton-Arachide-Sorgho	943 ^b	
Arachide-Coton -Sorgho	1022 ^a	
Arachide-Arachide		
Jachère-Sorgho		
Sorgho-Sorgho		
Bloc	**	
Rotation (R)	**	
Fumure (F)	**	
Année (A)	**	
RxF	ns	
RxA	*	
FxA	ns	
RxFxA	ns	

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

3.2.3 Discussion

Les résultats ont montré très clairement que les fumures, les précédents légumineuses et les rotations comportant des légumineuses augmentaient significativement les rendements des deux cultures non fixatrices d'azote (le sorgho et le cotonnier). Les résultats des expérimentations de longue durée ont montré que les effets des fumures et des rotations comportant les légumineuses, devenaient de plus en plus marqués avec le temps.

Sur les deux sites et pendant toute la durée de l'étude, les fumures ont influencé les rendements du sorgho. Elles ont également augmenté significativement les rendements du cotonnier à Farakô-Ba. L'efficacité des fumures était renforcée quand on associait la dolomie ou les amendements organiques à l'engrais minéral. La pauvreté originelle des sols en éléments nutritifs explique cette efficacité des engrais sur les rendements des cultures (Berger *et al.*, 1987; Pieri, 1989 ; Bationo et Mokwunye, 1991 ; Bado *et al.*, 1997). L'efficacité des amendements organiques est liée au double rôle de la matière organique. En fournissant des éléments nutritifs par minéralisation et en neutralisant l'acidité du sol, les amendements organiques influencent très fortement les rendements des cultures en zone tropicale humide où la minéralisation des résidus organiques est rapide. Sur les sols d'Afrique de l'Ouest, on a très souvent observé que la mise en culture entraînait une diminution systématique de la matière organique du sol et une diminution des rendements (Pichot *et al.*, 1981; Berger *et al.*, 1987; Sédogo, 1981 ; Bationo et Mokwunye, 1991 ; Bado *et al.*, 1997). Les amendements organiques améliorent les propriétés physiques et chimiques et la disponibilité des éléments comme le phosphore (Bationo et Mokwunye, 1991) tout en fournissant des éléments nutritifs par minéralisation. Dans une expérimentation de longue durée sur les mêmes sols de Farako-Bâ, Bado *et al.*, (1997) ont observé l'efficacité remarquable du fumier sur la neutralisation de l'acidité et de l'aluminium échangeable. En neutralisant la faible acidité des sols et en apportant des éléments nutritifs aux plantes, le fumier améliore la nutrition minérale entraînant une augmentation des rendements des cultures.

L'efficacité de la dolomie est dû probablement à son rôle sur la neutralisation de l'acidité du sol. Cependant, la dolomie semble plus efficace et augmente beaucoup plus les rendements du cotonnier par rapport au sorgho. Cela peut s'expliquer par la sensibilité des deux cultures à l'acidité. Le cotonnier est plus sensible à l'acidité, expliquant l'efficacité plus remarquable de la dolomie sur le cotonnier (Berger et al., 1987 ; Sama, 1989 ; Bado *et al.*, 1993).

Les effets bénéfiques des légumineuses sur les rendements des cultures subséquentes ont été observés par plusieurs auteurs (Peoples et Crasswell, 1992 ; Peoples *et al.*, 1995 ; Wani *et al.*, 1995 ; Chalk, 1998 ; Bationo et Ntare, 2000). Peoples et Crasswell (1992) notent que dans les systèmes céréales-légumineuses, les précédents légumineuses peuvent augmenter les rendements de la céréale subséquente de 50 à 350%. Au Burkina Faso, Stoop et Van Staveren (1983) ont été parmi les premiers chercheurs qui ont démontré l'effet bénéfique du niébé sur l'augmentation des rendements du sorgho. Bationo *et al.*, (1991 a) ont trouvé que le précédent niébé augmentait les rendements du mil de 58 à 100%. Des résultats semblables ont été obtenus par Kouyaté *et al.* (2000). Bloem et Bloem et Barnard (2001) ont montré que les précédents niébé et arachide pouvaient augmenter les rendements du maïs de 27 et 90% respectivement. Malgré l'exportation des fanes, Kouyaté *et al.* (2000) observent que les précédent niébé pouvaient augmenter les rendements en grains du mil et du sorgho de 18 à 27%. Sur le cotonnier, Swement (1983) a montré que le précédent arachide augmentait les rendements en coton de 290 kg ha⁻¹ comparativement à la rotation maïs-cotonnier.

Les faibles rendements de la culture continue de sorgho, ou les hauts rendements dus aux précédents légumineuses ont été diversement interprétés. La première explication et la plus couramment utilisée est celle utilisant la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par les légumineuses pour justifier les capacités des légumineuses à améliorer la nutrition azotée des autres cultures (Danso et Papastylianou, 1992 ; Wani *et al.* 1995 ; Chalk, 1998).

La légumineuse fixe une certaine quantité d'azote dans l'atmosphère. Elle concentre généralement plus d'azote que les plantes non fixatrices d'azote. Dans les systèmes de culture, les résidus de légumineuses enrichissent le sol en azote. Par rapport à une

monoculture de céréale, une rotation culturale comportant une légumineuse fixatrice d'azote, enrichit peut être mieux le sol en azote par les résidus de la légumineuse et les autres cultures de la rotation peuvent bénéficier de cet azote par la minéralisation des résidus (Peaples *et al.* 1995, Chalk, 1998).

Ce schéma de transfert d'azote de l'atmosphère à la plante non fixatrice succédant à une légumineuse fixatrice d'azote par les résidus de la légumineuse semble classiquement accepté par les chercheurs (Chalk, 1998). Cependant, cette voie n'est probablement pas la seule et elle ne suffit pas pour expliquer les rendements souvent spectaculaires observés avec les précédents légumineuses.

Les légumineuses prennent généralement plus de la moitié de leurs besoins en azote dans l'atmosphère (Peaples *et al.*, 1995). Elles prélèvent alors moins d'azote dans le sol par rapport aux plantes non fixatrices. On peut imaginer que dans le système de rotation céréale-légumineuse où les deux plantes s'alimentent dans le même sol, la légumineuse «économiserait» de l'azote qui peut favoriser la céréale venant après la légumineuse. Cet effet «économie d'azote», peut contribuer à expliquer l'effet bénéfique global de la légumineuse sur la céréale subséquente (Wani *et al.*, 1995 ; Chalk, 1998).

Les effets des précédents légumineuses semblent se renforcer avec le temps et nous avons observé que les écarts de rendements entre la monoculture et les rotations Légumineuse-Céréale devenaient de plus en plus élevés. Ceci peut avoir plusieurs explications.

Quand il y a une légumineuse dans le système de rotation, elle peut améliorer le bilan de l'azote et renforcer de plus en plus la productivité des autres cultures au cours des années. Les écarts de rendements peuvent provenir de l'efficacité des légumineuses, ou des facteurs défavorables liés à la monoculture. Autrement dit, les effets des rotations peuvent être surestimés par les effets néfastes liés à la monoculture elle-même. Très peu de cultures supportent la monoculture sur plusieurs années. La culture continue comporte le risque évident de sélectionner et d'entretenir les parasites spécifiques pouvant entraîner une certaine baisse de rendements (Wani *et al.* 1995). Dans le cas du sorgho en particulier, certains auteurs suspectent aussi le phénomène d'allélopathie qui, en

pénalisant les rendements de la culture continue, peut surestimer du même coût l'effet du précédent légumineuse (Stoop et Van Staveren, 1983).

Tout en étant conformes à ceux des travaux antérieurs, nos résultats agronomiques font le constat de la supériorité des précédents légumineuses sur la monoculture de céréale. Cet augmentation des rendements des cultures subséquentes par les légumineuses, vérifie en partie notre deuxième hypothèse de recherche. Pour confirmer cette hypothèse, nous allons chercher à vérifier que les augmentations de rendements sont dues à l'azote apporté par les légumineuses. L'absorption et le recouvrement de l'azote par la cultures succédant aux légumineuses devraient nous aider à confirmer totalement notre deuxième hypothèse.

3.3 Prélèvements de N et P et recouvrement de l'azote par le sorgho

Les résultats précédents ont montré que les légumineuses fixent des quantités plus ou moins importantes d'azote et que les précédents légumineuses augmentaient les rendements des cultures succédant aux légumineuses. Pour affirmer que ces effets bénéfiques proviennent de l'azote apporté par des légumineuses, il nous fallait vérifier que les légumineuses augmentent effectivement la nutrition azotée des cultures subséquentes. C'est l'objectif de cette partie de notre recherche. L'absorption de l'azote et l'utilisation de l'azote provenant du sol et des engrais devraient nous permettre de vérifier cette hypothèse. Nous avons évalué les effets des légumineuses sur le recouvrement et la nutrition azotée en 2001 sur les expérimentations de longue durée de Kouaré et Farakô-Ba. En plus de l'azote, nous avons évalué l'effet des rotations comportant l'arachide sur l'absorption du phosphore par le sorgho sur le site de Farakô-Ba.

3.3.1 Site de Kouaré

Les résultats sont présentés sur le Tableau 19 (page 92) . Les rotations ont influencé significativement le prélèvement de l'azote, l'azote provenant du sol et de l'engrais, et le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté. Lorsque nous avons pratiqué la monoculture de sorgho, la nutrition azotée était très faible et le sorgho prélevait à peine 26 kg N ha⁻¹. Par contre, les rotations Niébé-Sorgho et Jachère-Sorgho augmentaient significativement l'azote provenant du sol et l'azote total prélevé par le sorgho.

Comparativement à la monoculture, la rotation Jachère-Sorgho augmentait l'absorption de l'engrais azoté de 60%, entraînant une amélioration du CRU de 9 unités. La jachère augmentait également l'azote prélevé dans le sol de 88%. Les effets positifs de la rotation Jachère-Sorgho sur l'absorption de l'azote de l'engrais et du sol ont entraîné une augmentation du prélèvement total de l'azote de 85% par rapport à la monoculture.

La rotation Niébé-Sorgho a été encore plus efficace que la rotation Jachère-Sorgho. Comparativement à la monoculture, la rotation Niébé-Sorgho augmentait l'absorption de l'engrais azoté de 35%, entraînant une amélioration du CRU de 5 unités. Le niébé augmentait très fortement le prélèvement de l'azote provenant du sol, et le sol de la rotation Niébé-Sorgho augmentait l'azote prélevé dans le sol de 14% par rapport à la monoculture. Les effets positifs de la rotation Niébé-Sorgho sur l'absorption de l'azote de l'engrais et du sol ont entraîné une augmentation du prélèvement total de l'azote de 20% par rapport à la monoculture.

Tableau 19 : Influence des rotations sur le prélèvement et le recouvrement de l'azote par le sorgho à Kouaré 2001

Rotations Culturales	N- Plante %	N-total kg ha ⁻¹	Ndff %	Ndff kg ha ⁻¹	Ndfs %	Ndfs kg ha ⁻¹	CRU %
Jachère-Sorgho	0.8	31 ^b	10.2a	3.2 ^a	89.8	27.8 ^b	26 ^a
Niébé-Sorgho	1.12	48 ^a	5.6c	2.7 ^{ab}	94.4	45.6 ^a	22 ^{ab}
Sorgho-Sorgho	1.15	26 ^c	7.7ab	2.0 ^c	92.3	24.3 ^{bc}	17 ^c
Test F	Ns	*	*	*	ns	*	*

CRU : Coefficient réel d'utilisation de l'azote

dff, Ndfs : représentent l'azote provenant de l'engrais et du sol respectivement.

* : significatif au seuil de probabilité de 0.05 selon le test de Fisher; ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

3.3.2 Site de Farakô-Ba.

3.3.2.1 Prélèvement et recouvrement de l'azote

Les résultats sont présentés sur le Tableau 20 (page 95) . À Farakô-Ba nous avons étudié le recouvrement sur trois traitements fumures (NPK, NPK+ Dolomie et PK+PN), ce qui nous permis d'évaluer à la fois les effets des fumures et des rotations sur le recouvrement de l'azote.

Comme à Kouaré, les rotations ont influencé significativement le prélèvement de l'azote, l'azote provenant du sol et de l'engrais, et le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté. Cependant, les prélèvements de l'azote du sol et des engrais et les CRU de l'azote sont plus élevés par rapport à Kouaré. Cela est probablement dû aux conditions climatiques plus favorables de la zone guinéenne. Les fumures ont influencé significativement le prélèvement de l'azote, l'azote provenant du sol et de l'engrais, et le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté

A) Effets des fumures

Le sorgho prélevait environ 78 kg N ha⁻¹ lorsque nous avons utilisé l'engrais minéral seul (Tableau 20, page 95). Cependant, l'association de l'engrais minéral avec la dolomie entraînait une augmentation significative de la nutrition azotée. Comparativement à l'engrais, l'association de la dolomie permettait d'augmenter le prélèvement de l'azote de 26%, indiquant que la neutralisation de l'acidité par la dolomie, favorisait l'absorption de l'azote. Le fumier était particulièrement plus efficace, et la fumure PK+ Fumier augmentait l'absorption de l'azote de 47% malgré l'absence d'azote minéral dans la fumure. Ainsi, l'azote apporté par le fumier contribuait significativement à la nutrition azotée.

Malgré leurs effets positifs sur la nutrition azotée, la dolomie et le fumier n'ont pas eu d'effets sur l'azote total provenant des engrais, ni sur le coefficient d'utilisation de l'azote. Par contre, les deux amendements ont influencé significativement le prélèvement de l'azote du sol. La dolomie et le fumier ont augmenté l'absorption de l'azote du sol de 30 et 54% respectivement. Ceci montre que ces deux amendements améliorent la nutrition azotée en augmentant beaucoup plus la capacité du sol à fournir l'azote.

B) Effets des rotations

Lorsque nous avons pratiqué la monoculture de sorgho, la nutrition azotée était faible et le sorgho prélevait à peine 50 kg N ha⁻¹ (Tableau 20, page 95). Par contre, les rotations incluant l'arachide et la rotation Jachère-Sorgho augmentaient significativement l'azote provenant du sol et de l'engrais, entraînant une augmentation de l'azote total prélevé par le sorgho.

Les rotations incluant l'arachide (Coton-Arachide-Sorgho et Arachide-Coton-Sorgho) et la rotation Jachère-Sorgho augmentaient le prélèvement de l'azote de 120 à 150% et n'existait pas de différence statistiquement significative entre les trois rotations. Comparativement à la monoculture, les rotations ont également augmenté le prélèvement

de l'engrais azoté de 62 à 162%. Les rotations incluant l'arachide étaient particulièrement très efficace sur le recouvrement de l'engrais azoté. Comparativement à la monoculture, le sorgho prélevait 2.3 à 2.6 fois plus d'azote dans l'engrais azoté, augmentant ainsi le CRU de 25 à 32 unités. Les sols des rotations fournissaient également 2.3 à 3.5 fois plus d'azote par rapport à la monoculture de sorgho et n'existait pas de différence significative entre les deux rotations.

Dans la rotation Jachère-Sorgho, le sorgho prélevait 1.7 fois plus d'azote dans l'engrais azoté, augmentant ainsi la CRU de 13 unités. Le sol de la rotation Jachère-Sorgho fournissait 2.3 fois plus d'azote au sorgho comparativement à la monoculture.

Tableau 20 : Influence des fumures et des rotations culturales sur le prélèvement et le recouvrement de l'azote par le sorgho à Farako-Bâ en 2001

	N-Plante %	N-plante kg ha ⁻¹	Ndff %	Ndff kg ha ⁻¹	Ndfs %	Ndfs kg ha ⁻¹	CRU %
Rotations							
Arachide-Coton-Sorgho	1.039	116 ^{ab}	0.10 ^c	10.6 ^b	0.90 ^b	105 ^{ab}	44 ^b
Coton-Arachide-Sorgho	1.029	119 ^a	0.11 ^a	12.3 ^a	0.89 ^{bcd}	107 ^a	51 ^a
Jachère-Sorgho	1.101	104 ^{abc}	0.08 ^{cd}	7.6 ^c	0.93 ^a	97 ^{abc}	32 ^c
Sorgho-Sorgho	1.054	48 ^d	0.10 ^{ab}	4.7 ^d	0.90 ^{bc}	43 ^d	19 ^d
Fumures							
NPK	0.978	78 ^c	0.12 ^a	8.9	0.88 ^c	69 ^c	37
NPK+Dolomie	1.104	98 ^b	0.09 ^b	8.4	0.91 ^b	90 ^b	35
PK+Fumier	1.085	115 ^a	0.08 ^{bc}	9.0	0.92 ^a	106 ^a	38
Bloc	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Rotation(R)	ns	***	**	***	**	***	***
Fumure(F)	ns	**	***	ns	***	**	ns
RxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

CRU : Coefficient réel d'utilisation de l'azote; Ndff, Ndfs : représentent l'azote provenant de l'engrais et du sol respectivement.

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00 ; ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

3.3.2.2 Prélèvement du phosphore

Nous avons évalué les effets des rotations sur le prélèvement du P en 2001 sur le site de Farakô-Ba uniquement (Figure 6, page 96).

Les rotations ont influencé significativement l'absorption de l'azote par le sorgho. Dans la monoculture, le sorgho prélevait environ 12 kg P ha⁻¹. Par rapport à la monoculture, la rotation Jachère-Sorgho permettait d'augmenter le P absorbé de 67%. L'absorption du P était la plus élevée quand l'arachide était présente dans la rotation. Dans la rotation incluant l'arachide (Coton-Arachide-Sorgho), le sorgho absorbait deux fois plus de phosphore comparativement à la monoculture de sorgho. Cependant, il n'existait pas de différence statistiquement significative entre les deux rotations.

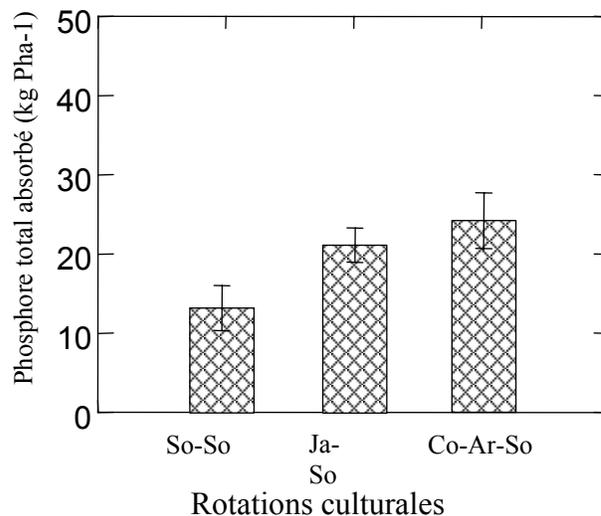


Figure 6 : Influence des rotations culturales après 9 années de culture sur le phosphore total absorbé par le sorgho en 2001 à Farakô-Ba

So, Ja, Co, Ar : Sorgho, Jachère, Coton, Arachide

3.3.3 Bilan partiel de l'azote

La première hypothèse de notre recherche postulait que l'azote fixé par les légumineuses contribue à enrichir le sol en azote. Dans les différentes rotations culturales, chaque culture prélève l'azote selon ses besoins. Par leur habilité à utiliser l'azote de l'atmosphère, les légumineuses prélèvent moins d'azote dans le sol, contrairement aux cultures non fixatrices qui ne disposent que de l'azote du sol. L'épuisement de la réserve en azote du sol sera probablement fonction des types de cultures utilisées. Le bilan des prélèvements de l'azote par les cultures peut nous permettre de vérifier notre hypothèse.

Nous avons fait un bilan de l'azote en considérant l'azote apporté par la fixation symbiotique et les exportations d'azote par les cultures. L'azote total exporté par le sorgho est utilisé comme référence. Les résultats sont présentés sur le Tableau 21 (page 99). Ce bilan montre que si toute la biomasse du sorgho (plante non fixatrice d'azote) était exportée, le système perdrait annuellement 78 à 110 kg N ha⁻¹ alors que la fumure minérale sans fumier n'apporte que 37 kg N ha⁻¹ par exemple. Dans un tel cas, le sol perdrait environ 48 à 65 kg N ha⁻¹ si tous les résidus de sorgho étaient systématiquement exportés du champ.

Avec une légumineuse comme l'arachide par exemple le bilan de l'azote demeure négatif si toute la biomasse est exportée (Tableau 21, page 99). Le sol perdrait chaque année 17 à 22 kg N ha⁻¹. Avec une application de 14 kg N ha⁻¹ sur les légumineuses par l'engrais minéral et un coefficient de recouvrement de 50%, le déficit en azote serait de 10 à 15 kg N ha⁻¹.

Avec le niébé, le bilan de l'azote demeure également négatif. Le système perd chaque année 22 à 34 kg N ha⁻¹, représentant un déficit réel en azote de 15 à 27 kg N ha⁻¹.

Si les bilans en azote du sorgho et des deux légumineuses sont négatifs, on note que les pertes probables liées à l'exportation des récoltes et des résidus de culture sont moins élevées avec les légumineuses. Ainsi, une culture de sorgho appauvrit 4 à 5 fois plus le sol en azote comparativement à une culture d'arachide. Le sorgho appauvrit 2 à 3 fois

plus le sol en azote comparativement au niébé. Ces données montrent que dans les systèmes de culture où les récoltes et surtout les résidus de culture sont en grande partie exportés comme au Burkina Faso, une culture de légumineuse appauvrit moins vite le sol en azote qu'une culture de céréale.

En comblant une part importante de leurs besoins en azote par la fixation symbiotique de l'azote, les légumineuses économisent l'azote du sol. Ainsi, sous l'hypothèse d'une exportation totale des résidus de récolte et en comparaison avec la culture continue de sorgho, un précédent arachide préserve 31 à 43 kg N ha⁻¹ du sol qui pourrait être utilisé par le sorgho venant après l'arachide par exemple. Le précédent niébé économiserait 33 à 38 kg N ha⁻¹. L'effet bénéfique des précédents légumineuses sur la culture suivante peut s'expliquer en partie par cette aptitude des légumineuses à utiliser moins d'azote provenant du sol. L'azote ainsi épargné peut finalement bénéficier aux cultures non fixatrices d'azote succédant aux légumineuses.

Ce bilan permet de se faire une idée de l'impact des deux types de cultures (légumineuses fixatrices d'azote et sorgho non fixateur d'azote) sur l'utilisation de l'azote dans les systèmes de cultures. L'azote est un élément très mobile. Il peut facilement sortir du système par les multiples voies de pertes d'azote. Ce bilan permet d'observer que le sorgho appauvrit plus vite le système en azote. Même si l'arachide et le niébé n'enrichissent pas le système en azote, ces deux légumineuses appauvrissent relativement moins vite le système en azote.

Cet effet "économie d'azote" par les précédents légumineuses a été bien illustré par Chalk (1998). Selon cet auteur, l'effet 'économie d'azote' est un effet indirect de la fixation symbiotique qui dans le système de rotation permet à la légumineuse d'utiliser en grande partie l'azote de l'atmosphère et à la céréale non fixatrice d'azote d'utiliser principalement l'azote du sol et des engrais.

Ce bilan partiel est une indication sur l'utilisation de l'azote du sol par les cultures dans les différents types de rotations. Il permet de montrer que les rotations comportant les légumineuses épuisement probablement moins vite l'azote du sol. Mais il ne permet pas de mesurer la contribution réelle de la légumineuses dans l'utilisation de l'azote du sol.

Au cours d'une saison agricole, l'azote minéralisé est systématiquement perdu par lessivage s'il n'est pas utilisé par la culture. On ne peut utiliser ce bilan de l'azote pour prédire les effets à long terme des légumineuses car la dynamique de l'azote dans le système sol plante atmosphère est beaucoup plus complexe.

Tableau 21 : Influence des fumures sur les prélèvements de l'azote (kg N ha^{-1}) par l'arachide, le niébé et le sorgho et le bilan en azote à Farako-Bâ en 2001

	----- Arachide -----			----- Niébé -----			Sorgho
	N plante	N fixé	Bilan	N plante	N fixé	Bilan	N prélevé
NK+PN	26	11	-15	50 ^{cd}	28 ^b	-22	-78
Engrais NPK	27	6	-21	54 ^c	19 ^c	-34	-85
NPK+ Dolomie	34	12	-22	64 ^{ab}	41 ^{ab}	-22	-102
NPK+ Fumier	35	18	-17	67 ^a	43 ^a	-24	-110
Moyenne	30	12	-19	59	33	-26	-94
Bloc	ns	ns	ns	*	*	ns	
Fumure	ns	ns	ns	*	*	ns	

** , : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; ns : Non significatif ($p > 0.05$)*

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

PN : Phosphate naturel

3.3.4 Discussion

Les résultats montrent très clairement que les sols des rotations comportant les légumineuses fournissaient plus d'azote au sorgho comparativement à ceux de la monoculture. L'effet bénéfique des légumineuses ne se limitait pas seulement à l'azote provenant du sol. Les légumineuses améliorent également l'absorption de l'azote provenant de l'engrais. Les effets bénéfiques des légumineuses sur l'utilisation des deux sources d'azote (le sol et l'engrais) conduisent à une augmentation significative de la

nutrition azotée. Ces résultats confirment notre troisième hypothèse, relative à l'influence des légumineuses sur l'utilisation de l'azote des différentes sources (sol et engrais).

L'effet positif des légumineuses sur la nutrition azotée s'explique par leur effets sur l'efficacité d'utilisation de l'engrais azoté. Les résidus de récoltes des légumineuses jouent probablement un rôle important. En augmentant l'azote organique du sol par leurs résidus riches en azote, les légumineuses peuvent augmenter la nutrition de la culture subséquente. Le bilan de l'azote montre que par leur capacité à utiliser l'azote de l'atmosphère, les légumineuses prélèvent moins d'azote dans le sol et appauvrissent moins vite le sol en azote, favorisant ainsi la nutrition azotée de la culture subséquente. L'apport de résidus organiques de meilleure qualité peut expliquer du même coup l'efficacité des légumineuses sur l'utilisation de l'engrais azoté.

Ce schéma est bien confirmé par nos résultats et ceux d'autres chercheurs (Kurtz et al., 1984 ; Varvel et Peterson, 1990). Les précédents légumineuses fournissaient plus d'azote au sorgho subséquent. Cet azote provient probablement de l'azote organique recyclé par les résidus de légumineuses. Par la technique de la dilution isotopique, Giller et al.(1995) ont montré que 15 à 20% de l'azote recyclé par les résidus de légumineuses était utilisé par la plante succédant à cette légumineuse. Varvel et Peterson (1990) ont même montré que les légumineuses améliorent à long terme le bilan de l'azote dans le système en expliquant que l'azote des résidus de légumineuses peut être absorbé par une culture subséquente et recyclé à nouveau par les résidus de cette deuxième culture. Ainsi, les légumineuses permettraient une meilleure circulation de l'azote dans le système.

Tout en fournissant plus d'azote par les résidus, les précédents légumineuses augmentent l'utilisation de l'azote apporté par l'engrais. De nombreux résultats ont également mis en évidence l'effet bénéfique des légumineuses sur le recouvrement de l'engrais azoté (Kurtz et al., 1984 ; Varvel et Peterson, 1990 ; Mvondo Awono, 1997 ; Mahadev et al., 2000). L'augmentation de la nutrition azotée est donc une conséquence logique du double rôle des précédents légumineuses sur l'utilisation de l'azote du sol et de l'engrais azoté. L'interaction azote organique et azote minéral favorise l'utilisation de l'azote des deux sources, conduisant à une meilleure nutrition en azote des plantes (Coleman *et al.*, 1989). Cependant, les résultats de Mvondo Awono (1997) indiquent que la dose d'engrais

minéral azoté influence le recouvrement de l'azote provenant de l'engrais azoté. Il a observé avec le lupin que le recouvrement de l'engrais azoté était meilleur avec les faibles doses d'engrais contrairement aux doses élevées. Ces résultats semblent indiquer qu'un certain équilibre entre les doses d'azote organique et minéral sont nécessaires pour avoir un bon recouvrement de l'engrais azoté.

Comme l'azote, les résultats de Farakô-Ba ont montré que l'arachide augmentait les prélèvements du phosphore. Cet effet bénéfique de l'arachide peut s'expliquer de deux façon. Les deux légumineuses ont augmenté à la fois les prélèvements de l'azote du sol et de l'engrais, conduisant à une augmentation de l'azote total absorbé par le sorgho subséquent. Cette augmentation de la nutrition azotée stimule la croissance de la plante, ce qui peut entraîner une plus grande absorption des éléments nutritifs. L'interaction positive entre la nutrition azoté et phosphatée a été très couramment observé (Christianson et Vleck, 1991; Foth, 1990). En général, la plante utilise mieux l'azote lorsqu'elle est bien alimentée en phosphore. Inversement, une bonne nutrition en azote favorise l'absorption du phosphore, expliquant l'effet bénéfique des légumineuses sur la nutrition phosphatée.

L'effet bénéfique sur le phosphore peut être lié spécifiquement aux résidus et aux exsudats racinaires des légumineuses. Conformément à nos résultats, de nombreux chercheurs ont été observés les effets positifs des légumineuses sur la disponibilité du P et le rôle des exsudats racinaires des légumineuses a été très souvent utilisés pour justifier leurs capacités à augmenter la disponibilité du P dans les sols (Nagarajah et al., 1970 ; Gardener et al., 1981 ; Subbarao et al., 1997). De nombreuses plantes légumineuses ont montré des aptitudes particulières à extraire et à utiliser le P dans les sols pauvres (Gardener et al., 1981). Les exsudats racinaires de certaines légumineuses seraient capables de solubiliser les phosphates de calcium et le phosphore occlue (Gardener et al., 1981 ; Subbarao et al., 1997), augmentant ainsi le phosphore assimilable. Gardner (1981) a donné une explication du processus conduisant à la solubilisation du P par les exsudats racinaires du lupin. L'acide citrique produit par les exsudats de lupin forment dans un premier temps des complexes avec le P lié au fer. Par une réaction de réduction, le fer ferrique (Fe^{3+}) est relâché par la suite en fer ferreux (Fe^{2+}). Les exsudats racinaires des

légumineuses peuvent ainsi diminuer l'adsorption du P par les argiles et les oxydes. Nagarajah *et al* (1970) ont trouvé que les acides aminés des exsudats racinaires des légumineuses diminuaient l'adsorption du P sur les argiles et les oxydes, augmentant le P disponible. Ae *et al.* (2001) ont pu démontrer que les exsudats racinaires de l'arachide étaient à l'origine de sa capacité à solubiliser le phosphore. Ils ont mis en évidence la capacité de deux acides organiques des exsudats racinaires de l'arachide (l'acide malique et l'acide 2-hydroxyméthyl-2-4-dihydroxypentanedioïque), capables de chélater le Fe^{3+} responsable de la rétention du P.

Enfin, les légumineuses peuvent favoriser l'infection du sol par les mycorhizes qui améliorent la disponibilité du P (Alvey *et al.*, 2001). Tous ces facteurs favorables peuvent conduire à une augmentation du P disponible et son absorption par les cultures succédant aux légumineuses. À long terme, tous ces facteurs concourent à une plus grande disponibilité du P dans les rotations comportant des légumineuses.

Les contributions en azote des légumineuses sur la nutrition azotée peuvent justifier leurs effets positifs sur les rendements des cultures succédant aux légumineuses. Cette contribution en azote doit être mesurable. Par analogie avec les engrais minéraux, il est possible d'évaluer les contributions en azote des légumineuses en terme d'équivalent azote. Nous avons utilisé la méthode des valeurs de remplacements en azote (VRFA) pour évaluer l'effet azote des légumineuses.

3.4 Valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses

3.4.1 Les valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses

Les équations de régressions de type polynomiales de second degré décrivant les relations entre les doses d'engrais azoté et les rendements du sorgho en fonction du précédent

cultural sont présentées sur la Figure 7 (page 104). Les valeurs de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) de l'arachide et du niébé sont présentées par le Tableau 22 (page 105).

Les précédents culturaux et l'azote ont influencé significativement les rendements du sorgho subséquent. On observe une réponse très significative à l'azote quel que soit le précédent cultural (céréale ou légumineuse) (Tableau 22, 105), indiquant que l'azote est un important facteur limitant les rendements du sorgho (Bationo et Mokwunye, 1991).

Quand on n'applique pas de l'engrais azoté, le sorgho produit environ une tonne de grains par hectare en monoculture ou lorsqu'il est précédé par le maïs. Les rendements du sorgho augmente quand il est cultivé après l'arachide ou le niébé même quand on applique pas de l'engrais azoté. Par rapport au précédents céréales (maïs ou sorgho) et en absence d'azote, les précédent niébé et arachide augmentes les rendements du sorgho de 54 et 64% respectivement.

Nous avons calculé les VRFA des légumineuses en utilisant les précédents maïs (maïs-sorgho) ou sorgho (sorgho-sorgho) comme témoins (Tableau 22, page 105). Le précédent niébé a une VRFA de 25 kg N ha⁻¹ quand le précédent maïs est utilisé comme témoin. Par contre, lorsque la monoculture de sorgho est utilisée comme témoin, le précédent niébé a une VRFA de 26 kg N ha⁻¹. Autrement dit, le précédent niébé équivaut à une application de 25 kg ha⁻¹ d'engrais azoté lorsque le sorgho est cultivé sans aucun apport d'engrais minéral. La VRFA de l'arachide variait entre 32 et 35 kg N ha⁻¹ quand les précédents maïs ou sorgho sont utilisés respectivement comme témoins. Ainsi, l'arachide a une contribution en azote équivalant à environ 35 kg N ha⁻¹ sur le sorgho subséquent.

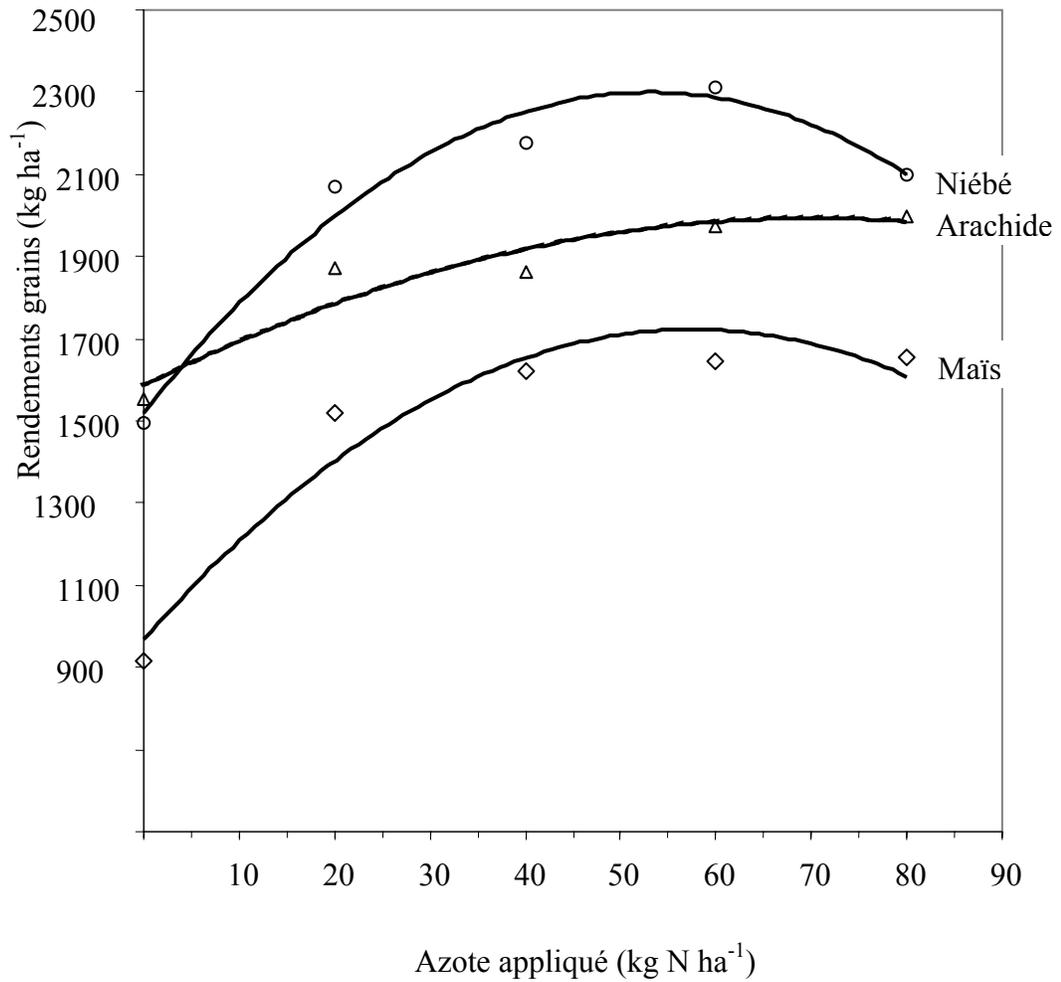


Figure 7 : Effets des précédents maïs, arachide et niébé sur la réponse du sorgho à l'engrais azoté en 2001 à Farakô-Ba

Tableau 22 : Fonctions de réponse du sorgho à l'azote selon le précédent et valeurs de remplacement en fertilisant azoté des légumineuses

-----VRFA-----				
Précédents cultureux	Équation de régression	R ² (%)	Témoin Maïs	Témoin Sorgho
Sorgho	$y = -0.114 N^2 + 15.38 N + 1184$	97	na	na
Maïs	$y = -0.2276 N^2 + 26.20 N + 969$	93	na	na
Niébé	$y = -0.2765 N^2 + 29.37 N + 1495$	97	25	26
Arachide	$y = -0.0828 N^2 + 11.61 N + 1586$	93	32	35
Analyse de la variance				
Bloc		*		
Précédent (P)		**		
Azote (N)		***		
Interaction PxN		*		

$Y =$ Rendement en sorgho grain en $kg\ ha^{-1}$

$N =$ Azote en $kg\ N\ ha^{-1}$

Na: non applicable

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.001 selon le test de Fisher

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

3.4.2 Précédent légumineuses et besoins en engrais azoté du sorgho

Les VRFAs nous ont permis d'évaluer les contributions en azote des précédents légumineuses sur le sorgho subséquent quand on n'applique pas de l'engrais azoté. Cependant, les précédents légumineuses influencent différemment les rendements du sorgho lorsqu'on applique l'engrais minéral. Les courbes de réponses à l'azote montrent comment les précédents cultureux influencent la réponse du sorgho à l'azote (Figure 7, page 104). Les pentes des équations de régressions montrent que l'efficacité de l'engrais azoté dépend de la culture qui a précédé le sorgho.

L'efficacité d'utilisation de l'engrais azoté par l'arachide est la plus faible. Après le précédent arachide, chaque kilogramme d'engrais azoté rapporte 11,6 kg de sorgho grain (Tableau 22, page 105). Cela s'explique par la forte VRFA de l'arachide. Quand on n'applique pas de l'engrais azoté, le précédent arachide augmente très fortement les rendements du sorgho. Par conséquent, l'application de l'engrais n'entraînent plus de grandes augmentations de rendement, ce qui justifie la faible pente de l'équation de régression. Avec la monoculture de sorgho, chaque kilogramme d'azote rapporte 15 kg de sorgho grain en deuxième année. Comparativement à la monoculture de sorgho, l'engrais azoté est mieux utilisé quand le maïs précède le sorgho et chaque kilogramme d'azote rapporte 26 kg de grain. Ainsi, la rotation des céréales non fixatrices d'azote peut permettre d'améliorer l'utilisation de l'engrais azoté. C'est le précédent niébé qui permet d'obtenir la plus forte efficacité d'utilisation de l'engrais azoté. Chaque kilogramme d'azote rapporte 29 kg de grain quand le niébé précède le sorgho.

La Figure 8 (page 108) et le Tableau 23, page109) présentent les doses d'engrais azoté nécessaire pour atteindre les rendements optimums du sorgho selon le précédent cultural, en utilisant la méthode linéaire-plateau (Cerrato et Blackmer, 1990 ; Cescas, 1991). Les doses optimales d'azote varient entre 35 et 58 kg N ha⁻¹ selon le précédent cultural (Tableau 23, page109). Sur la monoculture de sorgho, il faut appliquer 40 kg N ha⁻¹ pour atteindre un rendement optimum de 1640 kg ha⁻¹. Quand le maïs précède le sorgho, on peut appliquer 35 kg N ha⁻¹ et espérer un rendement de 1570 kg ha⁻¹.

Les doses optimales d'engrais azoté sont plus élevées quand le sorgho est précédé par les légumineuses. Le potentiel de rendement du sorgho est également élevé dans les rotations légumineuse-sorgho. Le sorgho produit presque 2 tonnes de grain par hectare quand il est cultivé après l'arachide avec une fumure apportant 51 kg N ha⁻¹. Le potentiel de rendement est encore plus élevé quand le niébé précède le sorgho. Avec 58 kg ha⁻¹ d'engrais azoté on peut obtenir un rendement 2,3 tonnes par hectare quand le sorgho est cultivé après le niébé.

Avec les rotations céréale-céréales (sorgho-sorgho et maïs-sorgho), les doses optimales d'azote sont faibles et les potentiels de rendement du sorgho sont également faibles. Dans les rotations céréale-céréale, le sorgho produit en moyenne 1600 kg ha⁻¹ de sorgho grain

avec 35 à 40 kg N h⁻¹. Au Burkina Faso, la dose d'engrais azoté recommandé sur le sorgho est de 37 kg N ha⁻¹ (Sédogo *et al.*, 1991). Les résultats confirment bien la pertinence de cette recommandation dans la monoculture de sorgho ou lorsque le sorgho est cultivé en rotation avec une autre céréale comme le maïs. Cependant, lorsque le sorgho est cultivé en rotation avec des légumineuses comme l'arachide ou le niébé, on devrait tenir compte des effets des précédents culturaux pour faire des recommandations d'engrais. Il n'y a malheureusement pas eu de travaux consacrés spécifiquement à des recommandations de fumure en fonction du précédent cultural. Les recommandations d'engrais sont faites habituellement avec des expérimentations annuelles en utilisant les courbes de réponse aux éléments nutritifs. Comme observé dans ces résultats, l'arachide et le niébé augmentent le potentiel de rendement du sorgho de 24 à 44%, exigeant l'application de 44 et 60 kg N ha⁻¹ respectivement.

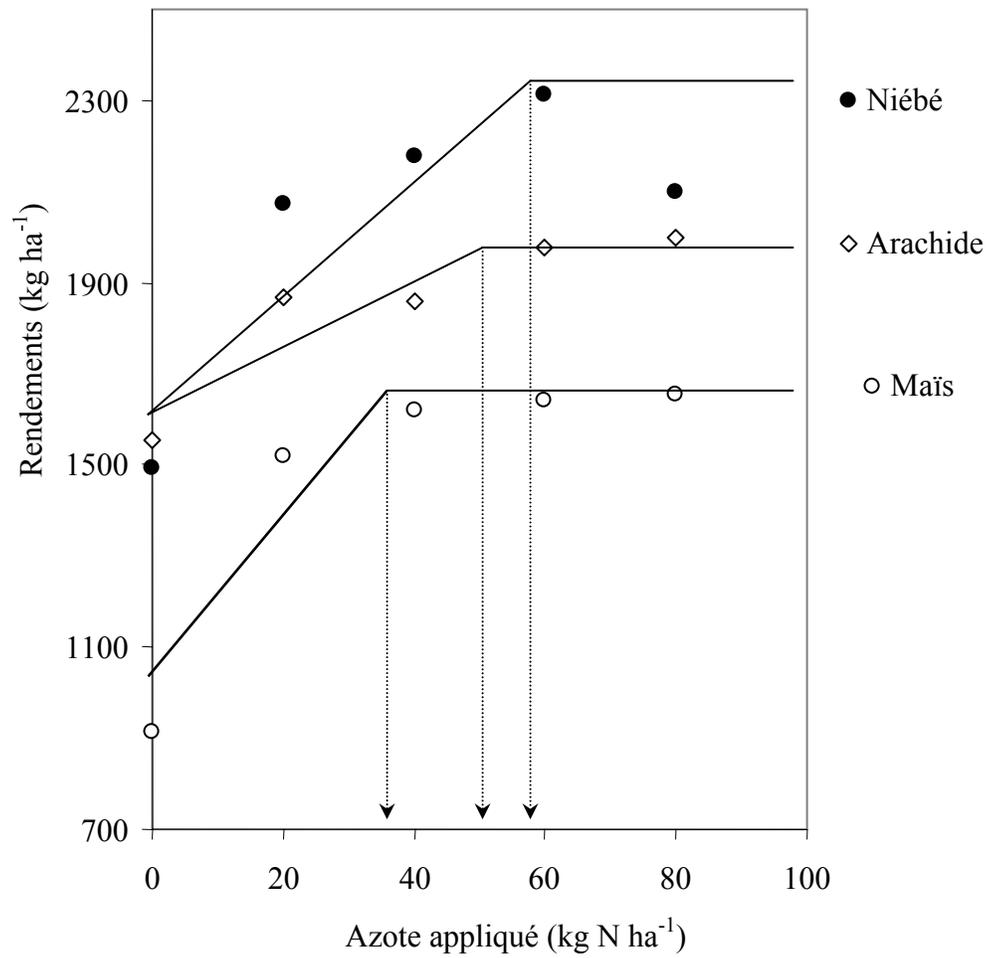


Figure 8 : Détermination des besoins en engrais azoté du sorgho selon le précédent cultural

Tableau 23 : Influence des précédents culturaux sur les besoins en engrais azoté et les rendements du sorgho

Précédents culturaux	Doses optimales d'engrais azoté (kg N ha ⁻¹)	Rendement Sorgho grain (kg ha ⁻¹)
Sorgho	40	1 640
Maïs	35	1 610
Arachide	51	1 963
Niébé	58	2 268

3.4.3 Discussion

Les précédents arachide et niébé augmentent les rendements du sorgho venant après ces légumineuses et le concept de la VRFA permet d'évaluer ces contributions des légumineuses en équivalent azote. Comparativement à une monoculture de céréale sur deux années successives, un précédent légumineuse (niébé ou arachide) apporte une contribution estimée à 25 à 35 kg N ha⁻¹ pour la sorgho venant après ces légumineuses. Il est très probable que cette contribution en azote proviennent des résidus des légumineuses. Les graines et les fanes sont exportés mais les résidus et la biomasse racinaire des légumineuses constituent une source d'azote organique qui en se minéralisant la saison suivante peuvent augmenter l'azote disponible pour le sorgho subséquent. L'azote organique apporté par les résidus des légumineuses peut expliquer l'effet bénéfique des légumineuses sur les rendements du sorgho. Même s'il n'est pas le seul facteur, l'azote provenant des résidus des légumineuses contribue à la nutrition azotée et l'accroissement des rendements du sorgho.

En plus de leurs effets bénéfique en absence d'engrais azoté, les précédents légumineuses valorisent mieux l'engrais azoté comparativement aux précédents céréales. Quand le sorgho est cultivé après l'arachide ou le niébé, il y'a une très forte réponse du sorgho à

l'azote. Que l'on utilise de l'engrais azoté ou pas, les précédents légumineuses démontrent leur supériorité sur la monoculture de céréale (sorgho-sorgho ou maïs – sorgho).

L'azote est-il le seul facteur justifiant l'efficacité des précédents légumineuses ? L'allure des courbes de réponse à l'azote semble montrer que cet élément n'est probablement pas le seul le seul facteur impliqué. Quel que soit la dose d'azote appliqué sur la monoculture de céréale (maïs-sorgho), les rendement du sorgho demeurent toujours inférieurs à ceux des précédents légumineuses (Figure 7, page 104). Si l'azote était le facteur, les fortes doses d'engrais azoté devraient permettre à la monoculture de céréale d'atteindre à un moment donné les niveaux de rendements des précédents légumineuses. Cette allure caractéristique des courbes de réponse indique que des facteurs autres que l'azote interviennent dans l'expression des rendements de la monoculture de céréale (Chalk, 1998).

La culture continue comporte en elle même des risques pouvant diminuer les rendements. Une culture continue de sorgho présente par exemple le risque d'induire des baisses de rendements liées au phénomène d'allélopathie (Stoop et *al.*, 1983) alors que la rotation peut briser le cycle d'infestation des parasites sur les cultures (Peoples et *al.*, 1995; Chalk, 1998). L'azote organique des résidus des légumineuses justifie en partie leur effets sur l'accroissement des rendements mais il y a bien d'autres facteurs qui méritent d'être pris en compte dans l'interprétation des effets des précédents légumineuses sur la culture suivante.

Dans sa conception, la VRFA exprime l'effet global du précédent légumineuse en équivalant azote comme si les légumineuses n'influencent les rendements de la culture subséquente que par l'azote uniquement. Cette méthode considère que le surplus de rendement observé après une culture de légumineuse provient exclusivement de l'effet azote de la légumineuse. On sait pourtant que lorsque les conditions de la fixation symbiotique de l'azote sont favorables, les légumineuses prélèvent moins d'azote que les céréales (Senaratne et Hardarson, 1988). En fixant plus d'azote dans l'atmosphère et en prélevant moins d'azote dans le sol, Chalk et *al.*, (1993) pensent que les légumineuses laissent probablement plus d'azote pour la culture subséquente ce qui expliquerait la

tendance de la VRFA à la surestimation de l'effet azote des légumineuses. La surestimation de la contribution en azote par la VRFA vient principalement du fait que la méthode assume que l'efficacité d'utilisation de l'azote de l'engrais et de la légumineuse est la même (Wani *et al.*, 1995) et ne distingue pas l'effet azote des autres effets des rotations (Hesterman *et al.*, 1987 ; Harris et Hesterman 1990) alors que les légumineuses peuvent aussi améliorer les propriétés chimiques et biologiques des sols (Hoshikawa, 1990) ou améliorer la nutrition phosphatée par une solubilisation des phosphates de calcium et du phosphore occlus (Gardener *et al.*, 1981).

La VRFA donne cependant une idée globale de la contribution de la légumineuse, exprimée en terme d'azote (Paré *et al.*, 1992). Malgré sa limite essentielle qui est la surestimation de la contribution en azote des légumineuses, la VRFA démontre au moins la supériorité des précédents légumineuses sur les monocultures de céréales.

3.5 Influence des légumineuses sur les propriétés du sol

Les résultats agronomiques nous ont démontré que les légumineuses augmentent la nutrition azotée et les rendements des cultures subséquentes, indiquant ces effets bénéfiques sont probablement liés à leur influence sur les propriétés des sols. Les capacités des légumineuses à enrichir par exemple le sol en azote peuvent être mesurées. L'influence de l'azote organique apporté par les légumineuses sur les autres propriétés chimiques du sol permettront d'évaluer et d'expliquer davantage les facteurs justifiant la performance des rotations incluant les légumineuses et de vérifier le dernier objectif de notre recherche.

3.5.1 L'azote minéral du sol

3.5.1.1 Effets des précédents légumineuses sur l'azote minéral

Si les cultures de légumineuses sont capables d'enrichir le sol en azote, entraînant une meilleure nutrition en azote de la culture suivante, il doit être possible de mesurer cette contribution en azote dans le sol en début de saison. En mesurant l'azote minéral total ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) disponible dans le sol en début de saison et avant l'application des engrais, on peut évaluer les contributions en azote des légumineuses. On peut évaluer de la même façon les effets des fumures de la saison précédente sur la disponibilité de l'azote en début de saison. L'azote minéral du sol a été mesuré le jour du semis et avant l'application des engrais.

A) Les fumures

Au semis, il n'y a pas d'effet statistiquement significatif des fumures appliquées la saison précédente sur l'azote minéral du sol (Figure 9, page 114). Cependant, l'azote minéral est plus élevé dans les parcelles qui ont été précédemment fertilisées avec la fumure organo minérale NPK +Fumier.

Les fumures influencent significativement l'azote minéral du sol une semaine après le semis. Sept jours après le semis, le sol des parcelles témoins non fertilisées, contient environ 12 kg N ha^{-1} (Figure 9, page 114). Par contre, les parcelles qui ont été fertilisées la saison précédente avec l'engrais minéral NPK sont plus riches en azote. Comparativement aux parcelles témoins non fertilisées, l'engrais minéral NPK augmente l'azote minéral de 33%. L'azote minéral est particulièrement très élevé au septième jours après semis dans les parcelles qui étaient fertilisées avec la fumure organo minéral (NPK+Fumier). La fumure organo minéral augmente l'azote minéral de 75% par rapport au témoin. Comparativement à l'engrais minéral NPK, l'ajout du fumier permet d'augmenter l'azote minéral de 31%.

Le fumier qui a été appliqué les saisons précédentes est une source de matière organique et d'azote pour le sol. Il enrichit le sol en matière organique qui par minéralisation, augmente l'azote minéral du sol. Les premières pluies de la saison entraînent un redémarrage de l'activité des microorganismes du sol et les teneurs en azote minéral des parcelles sont en relation avec les apports organiques par le fumier ou les résidus de récolte. Comme le fumier, les résidus de récolte non exportés sont une source de matière qui peuvent augmenter l'azote minéral par minéralisation. En augmentant la biomasse totale, l'engrais minéral augmente du même coup les résidus de récolte et la matière organique recyclée dans le sol. Comparativement aux parcelles témoins, la fertilisation minérale augmente ainsi l'azote minéralisable au cours de la saison suivante par l'augmentation des résidus de récolte, ce qui justifie les teneurs plus élevées en azote minéral en début de saison.

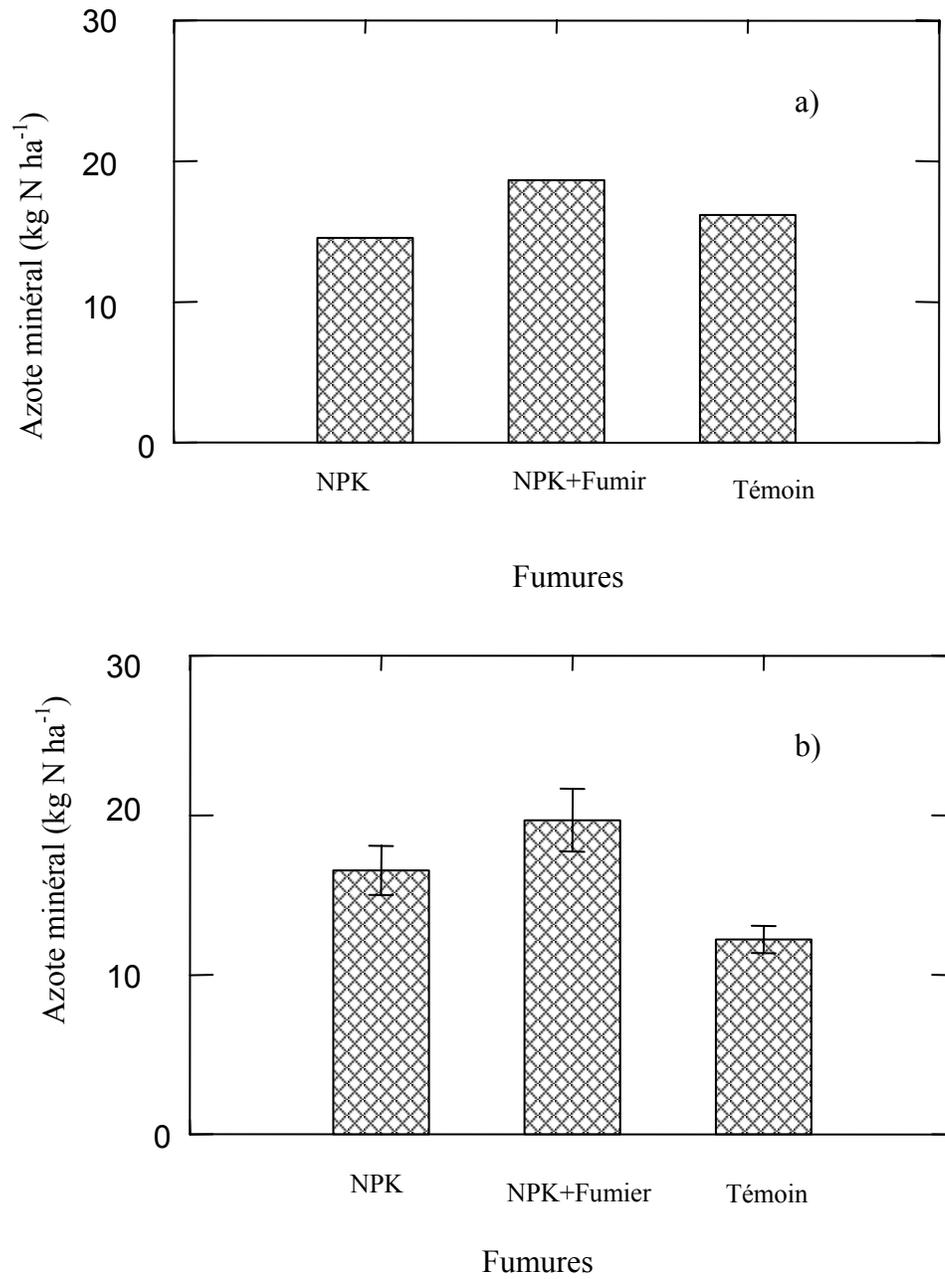


Figure 9 : Influence des fumures sur l'azote minéral du sol au semis (a) et 7 jours après le semis

B) Les précédents légumineuses

Comme les fumures, il n'y a pas d'effet statistiquement significatif des précédent culturaux sur l'azote minéral du sol au moment du semis (Figure 10, page 117). Mais comparativement à la monoculture de sorgho, l'azote minéral est plus élevé dans les parcelles des précédents légumineuses.

Par contre, les précédents culturaux influencent significativement l'azote minéral du sol une semaine après le semis (Figure 10, page 117). Sept jours après le semis, le sol des parcelles de la monoculture de sorgho contiennent environ 15 kg N ha^{-1} . Par rapport à la monoculture, le niébé augmente significativement l'azote minéral de 20%.

Comme le niébé, l'arachide augmente également l'azote minéral du sol. Par rapport au précédent sorgho, le précédent arachide augmente l'azote minéral de 13%. Mais l'azote minéral dû au précédent arachide n'est pas statistiquement plus élevé que celui de la monoculture de sorgho.

Les résidus non exportés des différentes cultures influencent certainement la minéralisation et la disponibilité de l'azote dans le sol en début de saison. Les faibles teneurs en azote minéral dans les parcelles en monoculture de sorgho peuvent s'expliquer par la nature et la qualité des résidus. Les résidus de sorgho sont relativement pauvres en azote. Ils sont plus riches en lignine et se décomposent moins vite. À l'inverse, les résidus de l'arachide et du niébé sont plus riches en azote et se décomposent plus vite, libérant plus d'azote. Certes, tout apport de résidus de récolte est une source de matière organique et d'azote potentiellement minéralisable. Cependant, ces résultats montrent que la nature et la qualité des résidus sont deux facteurs importants et l'azote minéral est un bon indicateur pour évaluer les contributions en azote des précédents culturaux (Borrios *et al.*, 1998).

Si le niébé semble plus efficace que l'arachide dans l'enrichissement du sol en azote, c'est parce qu'il est plus riche en azote, il produit plus de biomasse. En cours de saison le niébé perd plus de feuilles que l'arachide. À la récolte, une grande partie des racines de l'arachide sont exportées avec les gousses. Il est très probable que le niébé recycle plus de résidus et d'azote organique dans le sol que l'arachide.

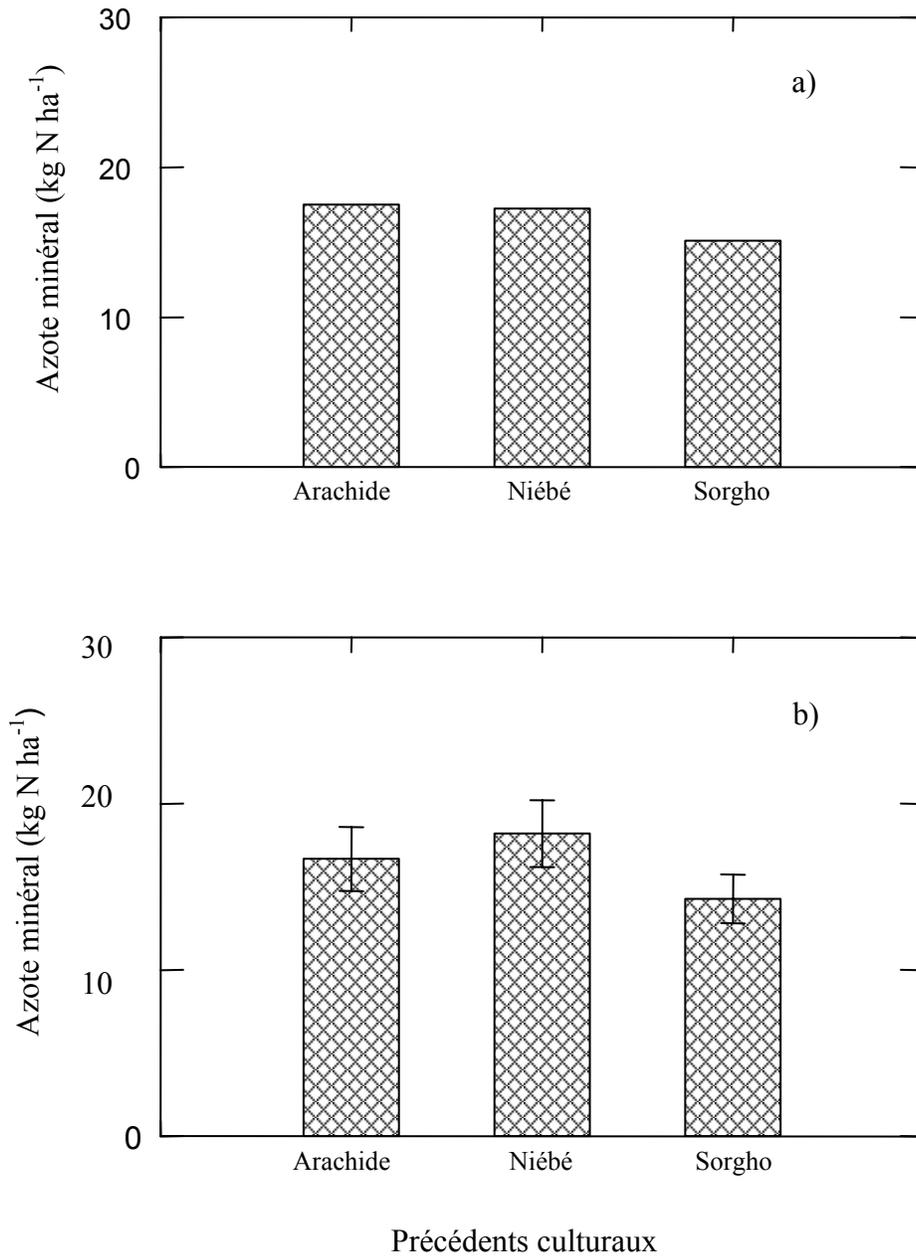


Figure 10 : Influence des légumineuses sur l'azote minéral du sol au semis (a) et 7 jours après le semis (b) en 2001 à Farakô-Ba

3.5.1.2 Effets à long terme des légumineuses sur l'azote minéral

Les effets des fumures et des rotations culturales sur l'azote minéral du sol sont représentés par la Figure 11 (page 120). Les fumures et les rotations ont influencé significativement l'azote minéral du sol. Sur les fumures et les rotations, l'azote minéral suit la même évolution au cours de la saison. Il était plus élevé en début de saison. Les premières pluies de la saison entraînent une reprise de l'activité des microorganismes responsables de la minéralisation, expliquant les quantités élevées d'azote minéral au moment du semis.

L'azote minéral diminuait lentement pendant les 30 premiers jours. Il y a eu une chute rapide de l'azote minéral entre le 29^{ème} et le 44^{ème} jour après semis. Cette forte diminution de l'azote minéral peut s'expliquer par l'évolution de l'activité microbienne et l'utilisation de l'azote par le sorgho. Après le flush de minéralisation dû à la ré-humectation du sol par les premières pluies, il y a eu une stabilisation de l'activité microbienne. Pendant la même période, les plants de sorgho qui étaient en période de croissance, absorbaient beaucoup plus d'azote. Les pluies étaient également abondantes pendant cette même période et il est probable que les pertes d'azote soient aussi élevées à cette période. Malgré cette évolution, les fumures et les rotations culturales se distinguaient par leur influence sur l'azote minéral du sol.

A) Les fumures

Les effets des fumures ont été très variables sur la période de mesure à cause certainement de l'azote apporté par les engrais et les variations des facteurs climatiques au cours de la saison (Figure 11, page 120).

Au semis, les parcelles non fertilisées contenaient à peine 20 kg N ha⁻¹. Dans les parcelles précédemment fertilisées avec l'engrais minéral seul ou associé avec le fumier, l'azote

augmentait de 20 à 25%. Durant les 44 premiers jours après le semis, l'azote minéral demeurait très faible dans les parcelles témoins non fertilisées. Ces faibles niveaux d'azote minéral pouvaient être dus au fait que dans ces parcelles non fertilisées, les faibles quantités d'azote étaient exportées par le sorgho.

Après le semis et avec les applications d'engrais, l'engrais minéral NPK augmentait l'azote minéral du sol par l'azote apporté. Mais au semi, on retrouvait les mêmes quantités d'azote minéral dans les parcelles fertilisées avec l'engrais minéral NPK et celles recevant la fumure PK+Fumier, malgré l'absence d'azote minéral dans la fumure. Cela peut s'expliquer par les apports annuels de fumier qui améliore à la fois les propriétés physico-chimiques du sol et augmente l'azote minéral par minéralisation de la matière organique. Le rôle bénéfique du fumier sur l'azote minéral est surtout remarquable au 15^{ème} jour après le semis et l'azote minéral des parcelles fertilisées avec la fumure PK+Fumier est significativement plus élevé que celui des parcelles recevant la fumure minérale NPK. L'azote du fumier se minéralise avec le temps alors que l'azote minéral de l'engrais qui est déjà sous forme NO_3^- peut se perdre par lessivage.

B) Les rotations

Contrairement aux fumures, il y a eu des différences plus marquées entre les rotations culturales (Figure 11, page 120). Durant toute la saison, les quantités d'azote minéral ont été toujours très faibles dans les parcelles en monoculture de sorgho (Figure 11, page 120). Par contre, les plus fortes quantités d'azote minéral sont obtenues lorsque l'arachide est présente dans la rotation (Coton-Arachide-Sorgho)

Au semis et avant tout apport d'engrais, les parcelles de la monoculture de sorgho contenaient les plus faibles quantités d'azote minéral estimé à environ 20 kg N ha^{-1} . Comparativement à la monoculture de sorgho, la rotation Jachère-Sorgho augmentait l'azote minéral de 25%. Les plus grandes quantités d'azote minéral étaient obtenues lorsque l'arachide précède le sorgho (Coton-Arachide-Sorgho). La présence de l'arachide dans la rotation entraînait une augmentation de l'azote minéral de 40% au semis.

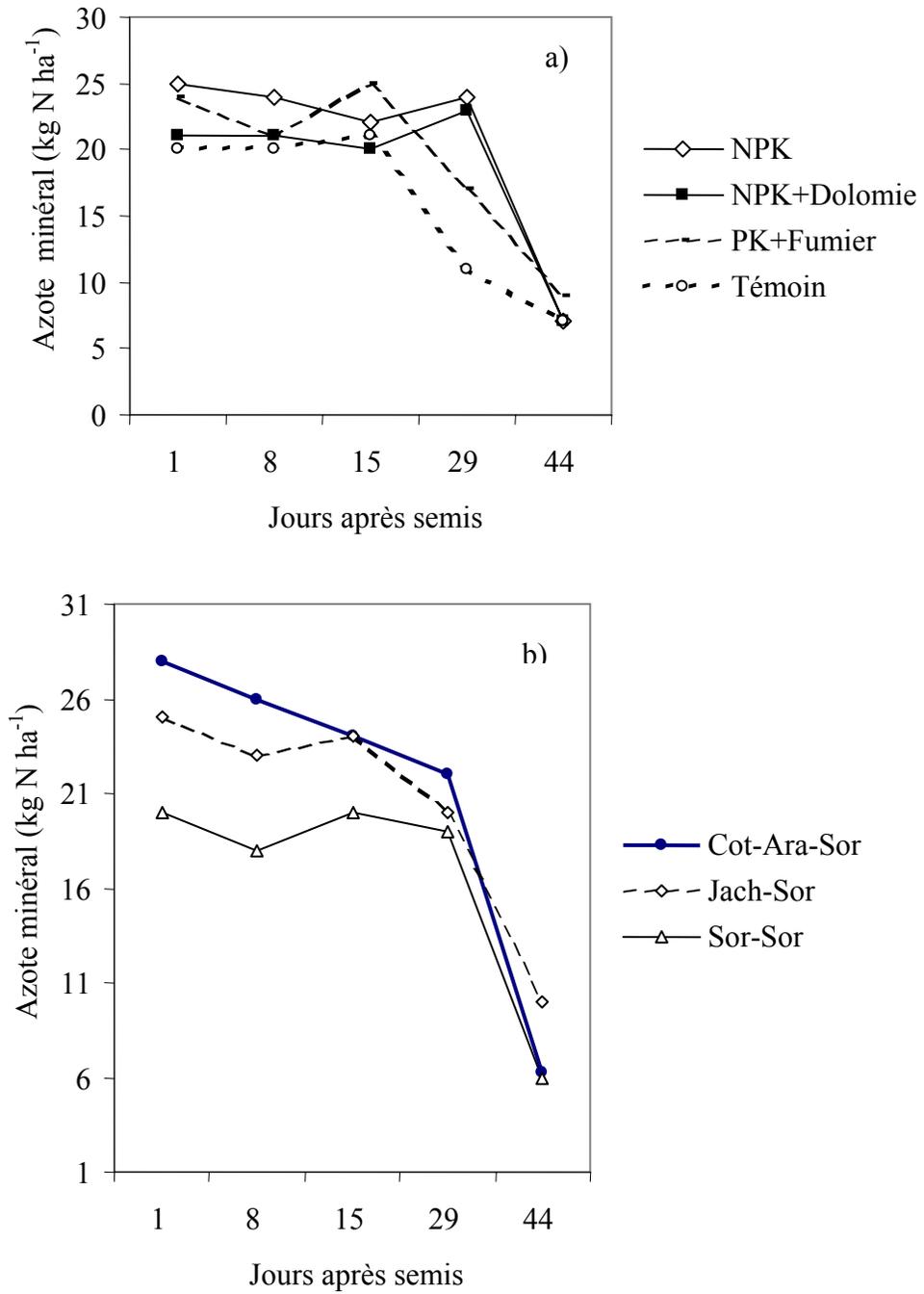


Figure 11 : Influence des fumures (a) et des rotations (b) sur l'azote minéral du sol pendant les 45 premiers jours après le semis en 2001 à Farakô-Ba

Cot, Ara, Sor, Jach : Cotonnier, Arachide, Sorgho, Jachère

3.5.1.3 Discussion

L'augmentation de l'azote minéral par les précédents légumineuses a été observée dans des travaux antérieurs (Wani *et al.*, 1995 ; Bationo et Ntare, 2000). Sur plusieurs sites au Niger, les résultats analogues de Bationo et Ntare (2000) ont montré que l'azote minéral est très faible en monoculture de mil alors que les précédents arachide et niébé augmentent significativement les quantités d'azote minéral. Dans une étude sur la rotation maïs-niébé au Zimbabwe, Shumba (1990) trouve que le précédent niébé augmente l'azote du sol et 32 kg N ha^{-1} par rapport à la monoculture de maïs. Par une revue de littérature sur les effets des légumineuses, Wani *et al.* (1995) concluent que l'azote minéral du sol est généralement plus élevé dans les systèmes de culture incluant les légumineuses comparativement aux systèmes sans légumineuses.

En début de saison, l'azote minéral disponible dans le sol assure certainement une bonne installation de la culture. Il peut servir d'indicateur pour évaluer la disponibilité de l'azote pour la culture en début de croissance. Borrios *et al.* (1998) rapportent que l'azote minéral en début de saison est un bon indicateur pour mesurer les contributions en azote des précédents légumineuses.

La minéralisation de la matière organique du sol et l'azote complémentaire apporté par les engrais assurent la nutrition azotée de la plante au cours de la saison. Borrios *et al.* (1998) ont montré que 59% de la variance des rendements du maïs est due à l'azote minéral en début de saison et l'azote résultant de la minéralisation de la fraction légère de la matière organique au cours de la saison.

Bloem et Barnard (2001), ont utilisé les teneurs en nitrates en début de saison pour mesurer les bénéfices en azote dus aux précédents légumineuses. Comparativement aux monocultures de sorgho ou de maïs, les parcelles des précédents arachide et niébé avaient des avantages azotés de 7 et 32 kg N ha^{-1} respectivement. Ils notent cependant que malgré un faible avantage azoté en début de saison, le précédent arachide augmentait les rendements de 90%. Avec un meilleur avantage azoté (32 kg N ha^{-1}), le niébé augmentait les rendements du maïs de 27%.

Plusieurs mécanismes peuvent expliquer les effets bénéfiques des rotations légumineuses-céréales sur la disponibilité de l'azote dans le sol. Contrairement aux céréales qui n'utilisent que l'azote du sol, les légumineuses fixent l'azote atmosphérique et prélèvent moins d'azote dans le sol. Nous avons illustré cet effet 'économie d'azote' des légumineuses (Chalk, 1998) par le bilan de l'azote déjà présenté.

L'augmentation de l'azote minéral dans les rotations légumineuses-céréales peut s'expliquer par les résidus de récoltes recyclés dans le sol. Même si une grande partie des fanes des légumineuses est exportée, une partie non négligeable de feuilles et des parties souterraines sont recyclées dans le sol. À quantité égale, les résidus des légumineuses sont plus riches en azote et se décomposent plus vite que ceux du sorgho. Ils recyclent certainement plus d'azote dans le sol comparativement aux résidus de sorgho. Ainsi, dans la rotation légumineuse-céréale l'azote fixé dans l'atmosphère par la légumineuse, peut contribuer indirectement par le recyclage des résidus à augmenter l'azote disponible dans le sol (Varvel et Peterson, 1990). Les deux mécanismes (économie d'azote et recyclage des résidus des légumineuses riches en azote) peuvent justifier les quantités plus élevées d'azote minéral dans les rotations légumineuses-céréales.

3.5.2 Les propriétés chimiques des sols

Après 8 années de culture à Kouaré (1994-2001) et 9 années à Farakô-Ba (1993-2001), nous avons évalué l'influence des fumures et des rotations culturales sur les principales propriétés physico-chimiques des sols.

3.5.2.1 Les fumures

A) Site de Kouaré

Comparativement au sol de départ, la mise en culture a entraîné une diminution du carbone organique et de l'azote total quel que soit le type de fumure utilisée (Tableau 24,

page 125). La mise en culture du sol a entraîné une baisse du C organique et de l'azote de 52 à 56% et de 34 à 58% respectivement. La baisse de l'azote est particulièrement importante dans les parcelles témoins non fertilisés. Le sol perd 35% de son azote lorsqu'il est cultivé pendant 8 années sans apport d'engrais.

Comparativement au sol initial, les fumures n'ont pas eu d'effets sur les bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+), ni sur la CEC du sol. Elles ont augmenté par contre le taux désaturation du complexe en bases échangeables. Toutes les autres fumures entraînaient une baisse du pH-KCl de 0.2 à 0.5 unité. La fumure minérale NPK acidifiait beaucoup plus le sol que les autres fumures et entraînait une baisse du pH-KCl de 0.5 unité. L'acidité d'échange des parcelles fertilisées avec l'engrais minéral était 4 fois plus élevée avec une augmentation de l'aluminium de 6%.par rapport au sol initial. Au contraire, la dolomie empêchait l'acidification du sol et maintenait la CEC du sol au même niveau que celui du sol initial.

B) Site de Farakô-Ba

Comme à Kouaré, la, mise en culture a entraîné une diminution du carbone organique et de l'azote total quel que soit le type de fumure utilisée (Tableau 25, page 126). Après 9 années de culture, le carbone organique du sol a diminué de 15 à 25 % selon les fumures. La plus forte baisse de carbone organique était observée lorsque nous avons utilisé les fumures exclusivement minérales (25 %) et les parcelles non fertilisées (31 %) alors que les parcelles recevant la fumure organo-minérale (PK + Fumier) perdent seulement 15 % du carbone par rapport au sol du départ. Ces résultats montre que même si la le fumier n'augmente pas le carbone organique du sol, il permet de limiter la baisse du carbone organique par rapport à la fumure exclusivement minérale.

Par les éléments nutritifs apportés, les fumures augmentaient le P assimilable par rapport au sol initial. Mais la fumure organo-minérale (PK + Fumier) entraînait la plus forte augmentation du P assimilable. Cela peut s'expliquer par les surplus de P apportés par le fumier et par le rôle bénéfique de la matière organique sur la disponibilité du phosphore (Nagarajah *et al.*, 1970). Comparativement à la fumure minérale NPK, l'ajout du fumier a

entraîné une augmentation des cations échangeables (K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}), la capacité d'échange cationique et la saturation du complexe en bases échangeables. Le surplus d'éléments nutritifs apportés par le fumier, en particulier le potassium et le rôle bénéfique des amendements organiques sur la capacité d'échange cationique expliquent cet effet positif de la fumure organo-minérale. Mieux que le fumier, la dolomie a augmenté significativement le calcium, le magnésium, la saturation du complexe en base et la capacité d'échange cationique. Ainsi, le calcium et le magnésium apportés par la dolomie ont eu des effets très bénéfiques sur la capacité d'échange cationique du sol. Par rapport à la fumure exclusivement minérale (NPK), l'utilisation du fumier (NPK + Fumier) ou de la dolomie (NPK + dolomie) entraînait une augmentation du pH, une diminution de l'acidité d'échange et de l'aluminium sur le complexe d'échange.

Tableau 24 : Influence des fumures et des rotations sur les propriétés chimiques du sol après 7 années de culture (1994-2000) à Kouaré (horizon 0-20 cm).

	pH eau	pH KCl	C. org (%)	N-total mg N kg ⁻¹ sol	K ⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	Ca ⁺⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	Mg ⁺⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	Al ³⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	AE Cmol+ kg ⁻¹ sol	ECEC Cmol+ kg ⁻¹ sol	TSB (%)	TSA (%)
<i>Rotations</i>												
Jachère-Sorgho	6.0	5.3	0.39 ^b	360 ^b	0.11	1.43 ^b	0.44	0.01	0.04	2.10	95 ^b	3 ^a
Niébé-Sorgho	6.1	5.2	0.29 ^c	294 ^c	0.09	1.09 ^c	0.53	0.01	0.04	1.84	94 ^b	3 ^a
Sorgho-Sorgho	6.2	5.3	0.29 ^c	335 ^c	0.14	1.07 ^c	0.35	0.01	0.04	1.68	94 ^b	3 ^a
Sol du départ	6.0	5.5	0.50 ^a	427 ^a	0.13	1.59 ^a	0.51	0.00	0.02	2.30	99 ^a	0 ^b
<i>Fumures</i>												
NP+Résidus	6.1	5.2b	0.32	318 ^a	0.10	1.15	0.33	0.00 ^b	0.05 ^b	1.72	93 ^c	4 ^b
NPK	5.8	5.0c	0.33	317 ^a	0.10	1.12	0.27	0.03 ^a	0.08 ^a	1.70	88 ^b	6 ^a
NPK+Dolomie	6.3	5.6a	0.32	270 ^b	0.10	1.38	0.62	0.00 ^b	0.01 ^d	2.17	99 ^a	0 ^d
Témoin	6.2	5.3b	0.32	237 ^c	0.15	1.13	0.54	0.00 ^b	0.03 ^c	1.91	97 ^a	2 ^c
Bloc	ns	ns	***	ns	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns
Rotation(R)	ns	ns	***	***	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	*
Fumure(F)	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	*	**	ns	**	**
RxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

C.org, P-BrayI, AE, TSB et TSA désignent respectivement le carbone organique, le phosphore assimilable (méthode Bray I), l'acidité d'échange et les taux de saturation en base et en aluminium du complexe d'échange du sol.

, **, * : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00 ; ns : Non significatif (p>0.05)*

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p<0.05, selon le test de Fisher

Tableau 25 : Influence des fumures et des rotations sur les propriétés chimiques du sol après 9 années de culture à Farakô-Ba (horizon 0-20 cm).

	pH eau	pH KCl	C. org (%)	P-BrayI mg P kg ⁻¹ sol	N-total mg N kg ⁻¹ sol	K ⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	Ca ⁺⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	Mg ⁺⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	Al ³⁺ Cmol+ kg ⁻¹ sol	AE Cmol+ kg ⁻¹ sol	ECEC Cmol+ kg ⁻¹ sol	TSB (%)	TSA (%)
Rotations													
Cot-Arach-Sorgho	6.3 ^b	4.9 ^b	0.39 ^b	6.2 ^b	373 ^c	0.17 ^b	0.87 ^c	0.45	0.08 ^a	0.16 ^a	1.82	81 ^b	9 ^a
Jachère-Sorgho	6.4 ^b	5.3 ^a	0.54 ^a	4.1 ^c	462 ^b	0.22 ^a	1.16 ^a	0.49	0.01 ^b	0.06 ^c	2.02	93 ^a	3 ^b
Sorgho-Sorgho	6.3 ^b	4.9 ^b	0.36 ^c	7.9 ^a	372 ^c	0.21 ^a	0.87 ^c	0.42	0.08 ^a	0.15 ^a	1.83	79 ^b	10 ^a
Sol du départ	6.5 ^a	5.1 ^a	0.55 ^a	2.7 ^d	506 ^a	0.02 ^c	1.08 ^b	0.46	0.01 ^b	0.08 ^c	1.82	96 ^a	1 ^c
Fumures													
NPK	6.0 ^e	4.5 ^d	0.41 ^{bc}	6.7 ^b	386 ^b	0.15 ^c	0.61 ^d	0.22d	0.15 ^a	0.28 ^a	1.56 ^c	65 ^d	17 ^a
NPK+Dolomie	6.9 ^a	5.4 ^a	0.43 ^b	4.9 ^c	374 ^c	0.14 ^c	1.60 ^a	0.81a	0.00 ^c	0.01 ^d	2.60 ^a	99 ^a	0 ^d
PK+Fumier	6.4 ^b	5.4 ^a	0.47 ^a	10.3 ^a	459 ^a	0.35 ^a	0.97 ^b	0.46b	0.00 ^c	0.04 ^c	1.88 ^b	96 ^b	2 ^c
Témoin	6.2 ^c	4.9 ^c	0.38 ^d	3.2 ^d	308 ^e	0.18 ^b	0.72 ^c	0.30c	0.04 ^b	0.12 ^b	1.46 ^d	83 ^c	8 ^b
Bloc	ns	*	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Rotation(R)	*	***	***	***	***	*	*	ns	***	***	ns	***	***
Fumure(F)	***	***	*	***	*	***	***	***	***	***	***	***	***
RxF	***	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	***	***	ns	***	***

C.org, P-BrayI, AE, TSB et TSA désignent respectivement le carbone organique, le phosphore assimilable(méthode Bray I), l'acidité d'échange et les taux de saturation en base et en aluminium du complexe d'échange du sol.

, **, * : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00 ; ns : Non significatif (p>0.05)*

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de p<0.05, selon le test de Fisher

3.5.2.2 Les rotations culturales

A) Site de Kouaré

Comparativement au sol initial, toutes les rotations (Niébé-Sorgho, Jachère-Sorgho et Sorgho-Sorgho) diminuaient le C organique et de l'azote total du sol (Tableau 24, page 125). La rotation Niébé-Sorgho diminuait le C organique et l'azote total de 42 et 32% respectivement. De même, la monoculture de sorgho diminuait le carbone et l'azote de 42 et 21% respectivement. La rotation Jachère-Sorgho diminuait le C organique et l'azote total de 22 et 16% respectivement, et la jachère maintenait des niveaux de carbone et d'azote significativement supérieurs à ceux de la monoculture et de la rotation Niébé-Sorgho, indiquant que le recyclage de la biomasse de la jachère améliorait le statut organique du sol.

Par rapport au sol du départ, le Ca échangeable a diminué dans les trois rotations alors que le K, Mg et la CEC n'ont pas été affectés (Tableau 24, page 125). La diminution du calcium est liée probablement à l'absorption de cet élément par les cultures. Par contre, le niveau du potassium est maintenu à cause du potassium apporté annuellement par les engrais. Les rotations n'ont pas influencé l'acidité du sol. Elles ont diminué la saturation en bases échangeables et ont augmenté le taux de saturation en Al échangeable par rapport au sol initial.

B) Site de Farakô-Ba

Comme à Kouaré, toutes les rotations ont entraîné une diminution du C organique et de l'azote total par rapport au sol initial. Les rotations ont influé significativement le carbone organique, l'azote total et le phosphore assimilable du sol (Tableau 25, page 126). Comparativement au sol d'origine, la culture continue de sorgho et la rotation Coton-Arachide-Sorgho entraînaient une diminution du carbone organique de 29 et 34%

respectivement. Cependant, le précédent jachère permettait de maintenir le carbone organique au même niveau que celui du sol du départ. Toutes les rotations (Coton-Arachide-Sorgho, Arachide-Coton-Sorgho et Sorgho-Sorgho) diminuaient l'azote total comparativement au sol du départ. Seule la rotation Jachère-Sorgho maintenait cependant un niveau d'azote supérieur à ceux des deux autres rotations.

Le P assimilable a augmenté dans les quatre rotations. Le phosphore apporté par les engrais minéraux et les amendements organiques expliquent cette amélioration de la disponibilité du phosphore. La culture continue de sorgho maintenait un niveau plus élevé en phosphore assimilable. Cela peut s'expliquer par la faible absorption du phosphore que nous avons déjà observé dans la monoculture de sorgho (Tableau 25, page 126).

Les rotations culturales ont influencé également les cations échangeables (K^+ et Ca^{2+}). Toutes les trois rotations ont augmenté le K échangeable comparativement au sol du départ, probablement à cause du potassium apporté par les engrais organiques et minéraux (Tableau 25, page 126). Entre les trois rotations, le K échangeable est plus élevé sur la culture continue de sorgho et sur la rotation Jachère-Sorgho. Les quantités élevées de K échangeable sur la culture continue de sorgho peut s'expliquer par les faibles quantités de potassium prélevé par le sorgho qui produit les plus faibles rendements annuels.

Le rôle bénéfique de la matière organique sur la capacité d'échange cationique du sol explique certainement les quantités élevées de cations échangeables (K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) obtenues sur la rotation Jachère-Sorgho où la biomasse de la jachère est enfouie tous les deux ans. Cet effet bénéfique des résidus organiques sur les cations échangeables a eu comme conséquence, une augmentation de la CEC. Le précédent jachère maintient le taux de saturation en base au même niveau que celui du sol de départ alors que la culture continue de sorgho et la rotation Coton-Arachide-sorgho entraînent une désaturation du complexe en base échangeable.

Comparativement au sol du départ, la mise en culture a entraîné une légère acidification du sol quand on pratique la culture continue de sorgho ou la rotation Coton-Arachide-Sorgho. Ces deux rotations entraînaient une baisse du pH, une augmentation de

l'aluminium échangeable et de l'acidité, d'où une augmentation significative de l'aluminium sur le complexe d'échange.

Le précédent jachère maintenait par contre le pH, l'aluminium échangeable et l'acidité d'échange au même niveau que ceux du sol du départ (Tableau 25, page 126). Sur la rotation jachère-sorgho, le sol est cultivé une année sur deux. Les engrais minéraux sont également appliqués une année sur deux et uniquement sur le sorgho. Le recyclage des résidus organiques de la jachère, la faible utilisation des engrais minéraux et du travail du sol (tous les deux ans) expliquent la capacité de la rotation jachère-sorgho à maintenir l'acidité du sol au même niveau que celui du sol du départ.

C) Discussion

L'étude des propriétés chimiques avait comme objectif de vérifier que les effets positifs des légumineuses sur les rendements étaient dus à l'effet azote des légumineuses et ses conséquences sur les autres propriétés paramètres de la fertilité. Les résultats permettent de tirer un certain nombre de conclusions.

Les légumineuses n'augmentent pas l'azote total du sol. Au contraire, les résultats des expérimentation de longue durée montrent que les légumineuses n'empêchent ni la diminution du carbone organique, ni celle de l'azote total du sol. La diminution du carbone organique après la mise en culture des sols est un phénomène couramment observé (Pichot et al., 1981; Berger et al., 1987; Fauck *et al.*, 1989; Hien, 1990; Pieri, 1989). Dans les sols nouvellement mis en culture, l'activité agricole entraîne généralement une baisse du carbone organique. Sous la jachère naturelle, les différentes fractions de la matière organique du sol sont dans une certain équilibre. La mise en culture du sol entraîne une perturbation du milieu, imposant une certaine évolution du système vers un nouvel équilibre ayant comme conséquence une diminution de la matière organique par rapport au stock initial (Fauck et al., 1989; Coleman et al., 1989).

Ces données montrent aussi que l'azote total du sol n'est pas un paramètre indiqué pour évaluer l'effet azote des légumineuses. L'azote est un élément très mobile dont la

dynamique est assez complexe. La mesure de l'azote total dans le sol à une période donnée ne peut rendre compte de la disponibilité de cet élément dans le sol. Conformément à nos résultats, et ceux obtenus dans d'autres recherches (Bagayoko, 1999; Bationo et Ntare, 2000; Bagayoko et al., 2000; Bloem et Barnard, 2001), l'azote minéral est un très bon indicateur pour évaluer les contributions en azote des légumineuses.

L'ensemble des résultats obtenus sur l'azote minéral, le recouvrement de l'azote et la nutrition azotée montrent que l'azote est probablement le principal facteur justifiant l'accroissement des rendements des cultures succédant aux légumineuses. Cependant, cette conclusion n'est valable que si l'on considère à priori les facteurs relatifs aux éléments nutritifs comme seuls facteurs pouvant justifier les effets bénéfiques des légumineuses sur les cultures non fixatrices d'azote.

Cependant, d'autres facteurs relatifs aux parasites des cultures peuvent influencer les rendements et l'appréciation des effets des légumineuses. Par la richesse de leurs résidus en éléments nutritifs en général, et en azote en particulier, les légumineuses stimulent probablement l'activité biologique du sol qui peut aussi entraîner un développement plus important des parasites des cultures. Nous avons utilisé principalement le sorgho comme plante test pour évaluer les effets des précédents légumineuses. C'est une culture sensible aux nématodes et une forte infection du sol et du sorgho peut influencer l'effet « azote » des légumineuses (Sasser et Freckman, 1987 ; Koenning *et al.*, 1999) .

Dans la section suivante, nous avons évalué l'influence des précédents légumineuses sur les nématodes et leurs impact éventuel sur l'appréciation des effets «azote» des légumineuses.

3.5.3 Influence des légumineuses sur les nématodes

Nous avons évalué les effets des précédents légumineuses et l'impact à long terme des rotations incluant les légumineuses sur l'infection du sol et du sorgho par les nématodes. Les genres et la population totale des nématodes dans le sol et dans les racines du sorgho ont été déterminés.

3.5.3.1 Effets des précédents légumineuses sur les nématodes

Dans le sol, nous avons identifié quatre types de nématodes parasites du sorgho. Ce sont les nématodes du genre *Pratylenchus*, *Scutellonema*, *Helycotylenchus* et *Trychodorus*. Dans les racines du sorgho, seuls les genres *Pratylenchus*, *Scutellonema* ont été identifiés (Tableau 26, page 132).

Les analyses de variances ont montré que les fumures n'influencent ni l'infection du sol ni celle des racines du sorgho par les nématodes. Par contre, le précédent cultural influence très significativement l'infection du sol et des racines par les nématodes (Figure 12, page 133). Il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs. L'absence d'effet des fumures sur les nématodes explique l'absence d'interaction entre les deux facteurs (Fumure et Prédécent). Autrement dit les précédents culturaux influencent de la même façon les populations de nématodes quelle que soit la fumure.

Par rapport à la culture continue de sorgho, l'arachide diminuait considérablement l'infection du sol par les nématodes alors que le niébé augmentait la population des nématodes. Comparativement à la monoculture de sorgho, nous avons dénombré 4 à 8 fois moins de nématodes dans le sol quand l'arachide précédait le sorgho. Par contre, lorsque le niébé précédait le sorgho, le sol était est 2 à 3 fois plus infecté par les nématodes comparativement à la monoculture de sorgho.

Comme dans le sol, le précédent arachide diminuait l'infection des racines du sorgho par les nématodes (Tableau 26, page 132). Le précédent niébé a augmenté par contre la population des nématodes dans les racines du sorgho.

Tableau 26 : Influence des précédents culturaux et des fumures sur l'infection des racines du sorgho par les nématodes à 30 et 60 jours après le semis à Farako-Bâ en 2001

		Nématodes (nombre par gramme de racine)		
		Pratylenchus	Scutellonema	Total
30 Jours après semis	Arachide	8 ^c	4 ^c	12 ^c
	Niébé	389 ^a	60 ^{ab}	449 ^a
	sorgho	160 ^{ab}	72 ^a	232 ^{ab}
	Bloc	*	ns	ns
	Précédent (P)	**	*	**
	Fumure (F)	ns	ns	ns
	PxF	ns	ns	ns
60 Jours après semis	Arachide	4 ^c	0	4 ^c
	Niébé	109 ^a	0	109 ^a
	sorgho	69 ^{ab}	0	69 ^{ab}
	Bloc	**	na	ns
	Précédent (P)	**	na	**
	Fumure (F)	ns	na	ns
	PxF	ns	na	ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

na : non applicable

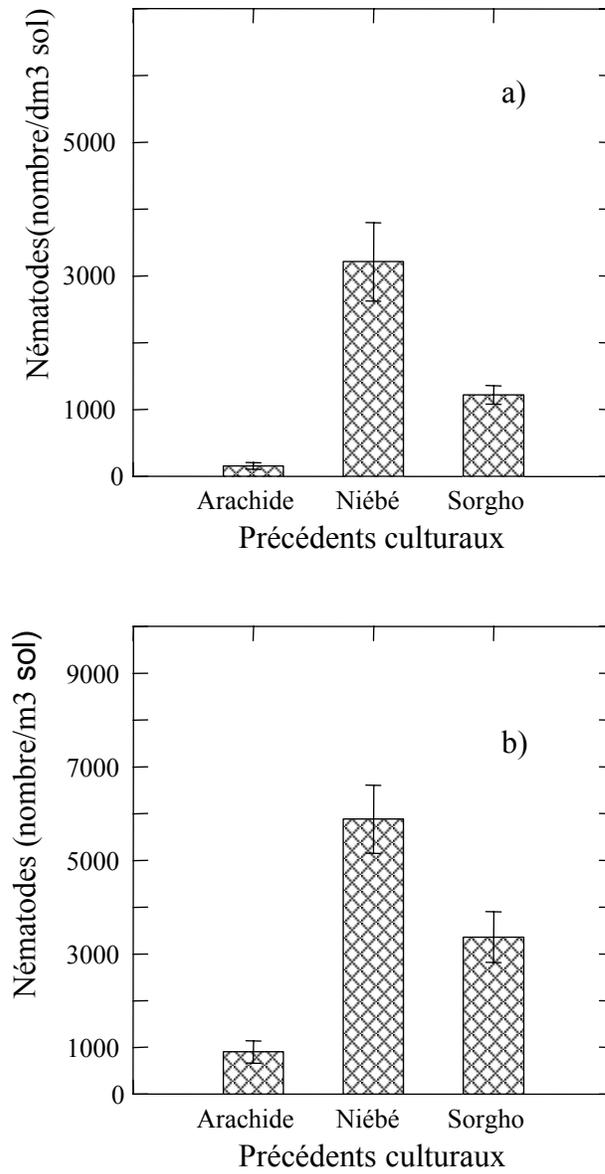


Figure 12 : Influence des précédents culturaux sur l'infection du sol par les nématodes à 30 (a) et 90 jours (b) après le semis à Farakô-Ba en 2001

3.5.3.2 Effets à long terme des légumineuses sur les nématodes

Les résultats précédents ont montré que l'arachide et le niébé influençaient significativement l'infection du sol et du sorgho par les nématodes dès la deuxième année de culture. Dans un système de culture à long terme on peut imaginer que la culture continue de sorgho présente le risque d'augmenter davantage la population des nématodes, contrairement aux rotations incluant l'arachide qui devraient diminuer l'infection du sol et du sorgho par les nématodes. Afin de vérifier cette hypothèse, les populations des nématodes ont été évaluées sur l'expérimentation de longue durée de Farakô-Ba en 2001 après 9 années de culture.

Comme précédemment, ce sont les nématodes du genre *Pratylenchus*, *Scutellonema*, *Helycotylenchus* et *Trychodorus* qui ont été identifiés dans le sol (Tableau 27, page 135). Dans les racines du sorgho, seuls les genres *Pratylenchus*, *Scutellonema* ont été identifiés (Tableau 28, page 137). Les différents types de fumures n'ont pas eu d'effets statistiquement significatifs ni sur l'infection du sol, ni sur le sorgho subséquent par les nématodes. Cependant, les rotations culturales ont influencé très significativement la population des nématodes dans le sol et sur les racines du sorgho pendant tout le cycle cultural, et il n'y a pas eu d'interactions statistiquement significatives entre les deux facteurs, confirmant que c'est uniquement le facteur rotation qui influence la population des nématodes.

Tableau 27 : Influence des rotations culturales après 9 années de culture sur l'infection du sol par les nématodes au semis, à 30, 60 et 90 jours après semis à Farako-Bâ (nombre/dm³ de sol)

		Précédents culturaux				Test F
		Arachide	Cotonnier	Jachère	sorgho	
Au semis	Nématodes					
	Pratylenchus	41 ^d	265 ^c	353 ^{ab}	543 ^a	***
	Scutellonema	33 ^d	283 ^{ab}	227 ^{abc}	335 ^a	***
	Helycotylenchus	63 ^d	2319 ^b	1459 ^c	3635 ^a	***
	Tylencho-rhynchus	11 ^{cd}	17 ^c	317 ^a	173 ^b	***
30 Jours après semis	Pratylenchus	18 ^d	503 ^a	221 ^{ab}	211 ^{abc}	***
	Scutellonema	308 ^d	1595 ^a	588 ^{bc}	908 ^b	***
	Helycotylenchus	310 ^d	4601 ^{ab}	2261 ^c	4577 ^a	***
	Tylencho-rhynchus	8 ^c	21 ^b	375 ^a	21 ^b	***
	Trychodorus	3 ^d	222 ^{ab}	97 ^c	286 ^a	***
60 Jours après semis	Pratylenchus	20 ^d	583 ^a	434 ^{abc}	5001 ^{ab}	***
	Scutellonema	699 ^{bc}	2407 ^a	692 ^{cd}	763 ^b	***
	Helycotylenchus	1013 ^d	1377 ^a	4029 ^c	5453 ^b	***
	Tylencho-rhynchus	48 ^b	25 ^c	74 ^a	74 ^a	*
	Trychodorus	777 ^b	462 ^c	939 ^a	138 ^d	***
					*	
90 Jours après semis	Pratylenchus	92 ^d	1603 ^a	1142 ^{ab}	927 ^c	***
	Scutellonema	545 ^{cd}	1811 ^a	548 ^{bc}	627 ^b	***
	Helycotylenchus	1974 ^d	14743 ^a	4976 ^{bc}	6867 ^b	***
	Tylencho-rhynchus	431 ^{ab}	328 ^c	555 ^a	72 ^d	***
	Trychodorus	73 ^a	5 ^d	34 ^b	11 ^c	***
	Meloidogyne	0 ^d	66 ^c	991 ^a	277 ^b	***

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

A) Les nématodes du sol

Depuis le semis jusqu'au 90^e jour après le semis, l'*Helycotylenchus* était le nématode dominant dans le sol quel que soit le précédent cultural (Tableau 27, page 135). Du semis jusqu'au 90^{ème} jour après le semis l'*Helycotylenchus* représentait 60 à 80% de la population totale des nématodes du sol.

Au semis, il y a eu une très forte infection du sol par les nématodes lorsqu'on pratiquait la culture continue de sorgho alors que les nématodes sont presque éliminés du sol quand l'arachide précédait directement le sorgho (coton-arachide-sorgho) (Figure 13, page 138). La rotation jachère-sorgho et le précédent coton (arachide-coton-sorgho) produisent les mêmes quantités de nématodes dans les sols.

Après le semis et quelle que soit la rotation culturale utilisée, la population des nématodes augmentait jusqu'au 90^{ème} jour. Les nématodes augmentaient très fortement quand le cotonnier précédait directement le sorgho. La rotation jachère-sorgho augmentait également les nématodes du sol et la jachère produisait autant de nématodes que la monoculture de sorgho à partir du 60^{ème} jour après le semis. Par contre la population des nématodes demeurait très faible quand l'arachide précède directement le sorgho (cotonnier-arachide-sorgho).

B) Les nématodes racinaires

Sur les types de nématodes inventoriés, *Pratylenchus* et *Scutellonema* représentent 60 à 99% des nématodes observés sur les racines du sorgho (Tableau 28, page 137).

Au 30^{ème} jour après le semis, les racines du sorgho étaient très fortement infectées par les nématodes quand le cotonnier ou la jachère précédaient le sorgho ou lorsqu'on pratiquait la monoculture de sorgho (Figure 13, page 138). Comme dans le sol, les racines sont très faiblement infectées par les nématodes lorsque l'arachide précédait directement le sorgho (coton-arachide-sorgho).

Pendant tout le cycle végétatif, le sorgho était fortement infecté quand il était précédé directement par le cotonnier (arachide-cotonnier-sorgho). Par contre, la population des nématodes était très faible quand l'arachide précédait directement le sorgho. Comparativement au précédent cotonnier, les racines du sorgho étaient moins infectées par les nématodes dans la rotation jachère-sorgho et dans la culture continue de sorgho.

Tableau 28 : Influence des précédents culturaux après 9 années de culture sur l'infection des racines du sorgho par les nématodes 30, 60 et 90 jours après semis à Farako-Bâ (nombre/g de racine)

		Précédents culturaux				Test F
		Arachide	Cotonnier	Jachère	sorgho	
Nématodes						
30 Jours après semis	Pratylenchus	23 ^d	528 ^{ab}	645 ^a	515 ^c	***
	Scutellonema	12 ^d	158 ^a	51 ^{bc}	76 ^b	***
60 Jours après semis	Pratylenchus	12 ^d	158 ^a	51 ^{bc}	76 ^b	***
	Scutellonema	8 ^d	273 ^{ab}	131 ^c	176 ^a	***
90 Jours après semis	Pratylenchus	63 ^d	651 ^a	240 ^{bc}	260 ^b	***
	Scutellonema	1 ^{bc}	3 ^a	0 ^d	2 ^b	*
	Meloidogyne	0 ^c	0 ^c	60 ^a	28 ^b	***

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

na : non applicable

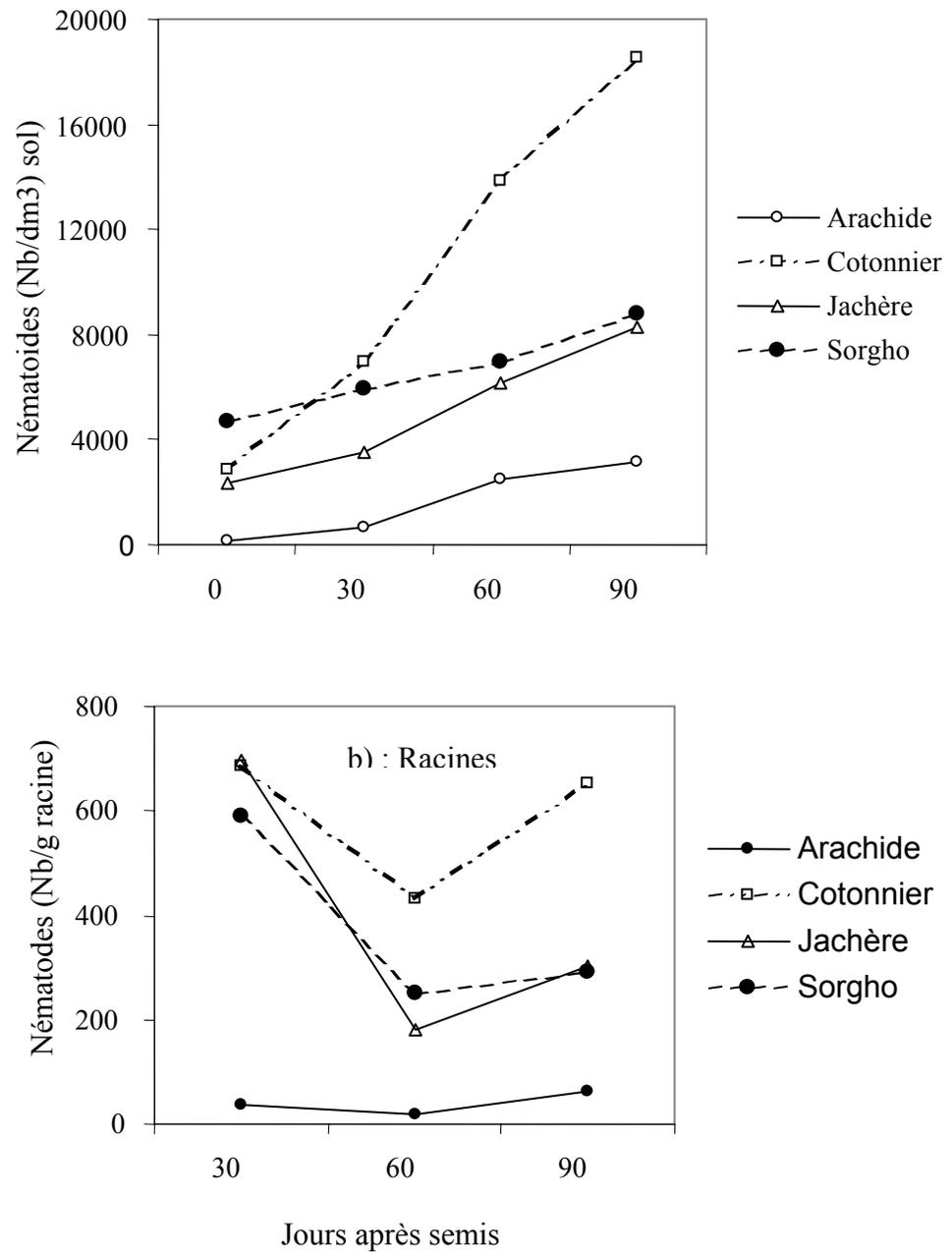


Figure 13 : Influence des rotations culturales sur l'infection du sol (a) et des racine du sorgho (b) par les nématodes au semis, à 30 jours, 60 et 90 jours après

3.5.3 3 Discussion

La monoculture de sorgho entretient une population de nématodes relativement élevée dans le sol favorisant l'infection des racines du sorgho par les nématodes. Les deux légumineuses influencent différemment la population des nématodes. Pendant que l'arachide diminue la population des nématodes, le niébé augmente l'infection du sol et du sorgho par les nématodes.

Des résultats analogues ont été également obtenus par Bagayoko (1999) sur l'arachide à Kouaré. Diop *et al* (2000) ont également montré que l'arachide est très appropriée pour contrôler les populations des nématodes au Sénégal. Dans une étude en milieu contrôlé, Alvey *et al.* (2001) indiquent que le précédent arachide peut diminuer de 60 à 80 fois l'infection du sol par les nématodes comparativement à la monoculture de céréale. Riekert et Henshaw (1998) ont trouvé que le niébé augmentait la population des nématodes. Dans la même étude, ont également observé que contrairement au niébé, l'arachide n'augmentait pas la population des nématodes. Baujard *et al.* (1996) ont trouvé que la monoculture de sorgho entretenait une forte infection en nématodes.

La diminution des nématodes par l'arachide est probablement liée à la nature des composés provenant des résidus de cette légumineuse. Les nématodes ont une affinité pour certaines plantes. Par contre, les résidus et les exsudats racinaires de certaines plantes sont antagoniques au développement des nématodes (Richard et Sayre, 1971). Selon Bagayoko (1999), l'arachide n'est pas un hôte favorable pour les nématodes parasites du sorgho. Elle diminue la population des nématodes pendant la saison de culture de l'arachide alors que les nématodes continuent de se multiplier dans la monoculture de sorgho. Contrairement à la monoculture qui entretient les nématodes, l'arachide permet de briser le cycle d'infestation des nématodes.

Cet effet de l'arachide sur la réduction des nématodes peut contribuer à expliquer son efficacité sur l'augmentation des rendements du sorgho venant après l'arachide. En maintenant un faible taux d'infestation du sol et du sorgho par les nématodes, l'arachide

influence d'une autre façon les rendements du sorgho subséquent. Cet effet bénéfique de l'arachide peut entraîner une augmentation de rendement par rapport à la monoculture qui est très parasitée par les nématodes. Ainsi, par la suppression des nématodes, l'arachide contribue par une voie autre que l'azote, à l'augmentation des rendements du sorgho subséquent.

Les valeurs de remplacement en fertilisation azoté (VRFA) des deux légumineuses semblent confirmer cette hypothèse. En effet, la VRFA de l'arachide (35 kg N ha^{-1}) était supérieure à celle du niébé (26 kg N ha^{-1}). Cependant, l'azote fixé par le niébé et l'azote minéral dû au précédent légumineuses sont plus élevés que ceux de l'arachide. Ces résultats indiquent que l'effet de l'arachide sur les nématodes est probablement comptabilisé dans la VRFA comme un effet « azote », justifiant la supériorité de la VRFA de l'arachide sur celle du niébé.

Discussion générale

Nos résultats ont montré clairement que lorsque l'arachide ou le niébé sont inclus dans les rotations, ils augmentent les rendements des autres cultures. Les résultats agronomiques ont démontré assez facilement l'accroissement de rendements des cultures succédant aux légumineuses. L'objectif principal de notre recherche visait à déterminer comment les légumineuses influencent les rendements des cultures subséquentes non fixatrices d'azote. Les résultats montrent que les légumineuses influencent les rendements des autres de plusieurs façons.

La première voie est celle de l'azote. Comparativement à une culture non fixatrice comme le sorgho qui utilise uniquement l'azote du sol, l'arachide et le niébé prélevaient 27 à 56% de leur azote dans l'atmosphère. Un raisonnement rapide consisterait à conclure que la supériorité des rotations légumineuses-céréales viendrait tout simplement du fait que les légumineuses épuisent moins vite le sol comparativement aux monocultures de céréales. Nos résultats sur le bilan de l'azote montrent effectivement que le sorgho prélève 4 et 5 fois plus d'azote dans le sol que le niébé et l'arachide respectivement. Autrement dit, le sorgho appauvrit 4 à 5 fois plus vite le sol en azote que les légumineuses.

Cependant, le bilan des prélèvements d'azote montre que la monoculture de sorgho devrait appauvrir plus vite le sol, mais ces résultats ne sont pas en conformité avec les analyses de sol. Sur les deux expérimentations de longue durée, il y a eu une diminution systématique de l'azote total sur toutes les rotations après 8 et 9 années de culture par rapport au sol initial. Il n'y avait pas eu de différence statistiquement significative entre l'azote total des sols des précédents légumineuses et ceux de la monoculture de sorgho. L'azote total mesuré dans le sol semble en contradiction avec le bilan effectué avec les prélèvements de l'azote.

Cette contradiction peut s'expliquer si l'on considère la dynamique de l'azote dans le système. L'azote est un élément dynamique dans le système sol plante atmosphère, et le dosage de l'azote total à une période donnée ne peut rendre compte de la capacité du sol à

fournir de l'azote. Il y a probablement un effet azote des légumineuses mais l'azote total du sol n'est pas un bon indicateur pour mesurer cet effet.

Par le processus de la fixation symbiotique, les légumineuses mobilisent l'azote de l'atmosphère et une quantité importante des résidus des légumineuses (parties souterraines et autres résidus) est annuellement recyclé dans le sol, constituant une source d'azote organique pour la culture suivante. Les résidus des légumineuses sont particulièrement riches en azote et constituent une source d'azote organique pouvant augmenter la disponibilité de l'azote dans le système.

Les résultats de l'azote minéral en début de saison montraient bien qu'il y avait une minéralisation plus importante de l'azote dans les parcelles des précédents légumineuses. En début de saison, les parcelles des précédents arachides pouvait libérer 40% d'azote de plus et le sorgho absorbait 3 fois plus d'azote que la monoculture de sorgho. Dans les parcelles des précédents niébé, le sol libérait 30 % d'azote de plus et le sorgho absorbait 2 fois plus d'azote que la monoculture de sorgho.

De plus, ces données semblent indiquer que le sorgho absorbe plus d'azote que l'azote minéral fourni par le sol. Avec le précédent arachide par exemple, une augmentation de 40 % de l'azote minéral se traduit par une augmentation de 170 % de l'azote total prélevé par le sorgho. Cela peut s'expliquer par la période de mesure de l'azote minéral, et l'influence des légumineuses sur l'utilisation de l'azote du sol et de l'engrais. L'azote minéral a été mesuré périodiquement et la méthode de mesure au champ ne permettait pas d'évaluer tout l'azote minéralisé au cours de la saison. La deuxième raison, et la plus intéressante provient de l'influence des précédents légumineuses sur l'utilisation de l'engrais minéral azoté par le sorgho subséquent. L'arachide et le niébé augmentaient le coefficient d'utilisation de l'engrais minéral azoté de 30 à 160 %. Ainsi les précédents légumineuses jouaient un double rôle sur la nutrition azotée du sorgho. Ils augmentent l'azote minéral par la décomposition de leur biomasse riche en azote et augmentent l'absorption de l'azote minéral apporté par les engrais (Kurtz et al., 1984 ; Varvel et Peterson, 1990 ; Mvondo Awono, 1997), dû à un meilleur développement racinaire.

La bonne utilisation de l'engrais minéral azoté dans les parcelles des précédents légumineuses peut s'expliquer par l'interaction positive qui est très souvent observée entre engrais organiques et minéraux dans la nutrition azotée (Berger *et al.*, 1987; Pichot *et al.*, 1981; Bationo et Mokwunye, 1991 c; Bado *et al.*, 1997). Cela est aussi confirmé par les variations des besoins en engrais azoté du sorgho avec le précédent cultural (Tableau 23, page 109). En monoculture, le sorgho a besoin de 40 kg N ha⁻¹ d'engrais azoté pour produire un rendement optimum de 1.6 T ha⁻¹ de sorgho grain. Par contre lorsque le sorgho est précédé par les légumineuses, on peut augmenter les doses d'engrais minéraux pour obtenir de plus hauts rendements. Après l'arachide ou le niébé on peut appliquer 51 ou 58 kg N ha⁻¹ pour des rendements optimaux de 2 et 2.3 T ha⁻¹ respectivement. En d'autres termes, les précédents légumineuses peuvent augmenter le potentiel de rendement du sorgho subséquent qui passe de 1.6 à 2.3 T ha⁻¹. Pour atteindre ce potentiel de rendement, il faut augmenter la dose d'engrais minéral azoté de 18 kg N ha⁻¹ parce que les précédents légumineuses améliorent l'utilisation de cet engrais minéral azoté par le sorgho venant après les légumineuses.

Outre l'azote minéral, l'azote absorbé et les coefficients réels d'utilisation de l'engrais azoté, la VRFA a permis de mesurer également les contributions en azote des précédents légumineuses sur la culture suivante. L'enrichissement du sol en azote organique par les résidus des légumineuses semble très logique quand on compare les effets des deux légumineuses étudiées par les VRFAs. Les contributions en azote des deux légumineuses sont estimées à un équivalent de 26 à 35 kg N ha⁻¹.

Cependant, l'interprétation des résultats des VRFAs doit tenir compte de la présence et de l'absence de l'engrais minéral azoté. Le niébé fixait plus d'azote que l'arachide. Il était plus riche en azote et ses résidus recyclaient probablement plus d'azote dans le sol. Les résultats agronomiques confirment effectivement la supériorité des précédents niébés sur les précédents arachides. Mais les valeurs de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) des deux légumineuses ne vont pas dans le même sens. Au contraire, l'arachide a une VRFA plus élevée (35 kg N ha⁻¹) que le niébé (26 kg ha⁻¹). Si la VRFA mesure efficacement l'effet azote, et rien que l'effet azote de la légumineuse, la VRFA du niébé devrait être supérieure à celle de l'arachide.

Ces résultats apparemment contradictoires peuvent bien s'expliquer. L'engrais azoté influence différemment les effets des deux précédents légumineuses sur les rendements du sorgho. La VRFA mesure effectivement l'effet azote de la légumineuse en absence de toute application d'azote sur le sorgho. Autrement dit, sans application d'azote sur le sorgho, le précédent arachide est plus efficace que le précédent niébé. Par contre lorsqu'on applique de l'engrais azoté sur le sorgho, le précédent niébé devient plus efficace. Sur les parcelles des précédents légumineuses, le sorgho a une plus forte réponse à l'azote bien représentée par les courbes de réponse (Figure 7, page 104). Donc, l'effet azote de l'arachide est supérieur à celui du niébé si et seulement si l'on n'applique pas de l'engrais azoté sur le sorgho subséquent. Lorsqu'on utilise l'engrais minéral, le précédent niébé devient plus efficace que le précédent arachide parce que l'engrais azoté est plus efficacement utilisé dans la rotation Niébé-Sorgho que dans la rotation Arachide-Sorgho.

Comparée à la VRFA donne une information complémentaire intéressante. La VRFA semble comptabiliser tous les effets du précédent légumineuses comme un effet azote, ce qui peut aboutir à une estimation biaisée de la contribution en azote des légumineuses. Nous avons observé que l'arachide diminuait fortement les nématodes parasites du sorgho contrairement au niébé qui augmentait la population des nématodes. La diminution des nématodes par le précédent arachide peut entraîner un certain gain en rendement que la VRFA mesure en terme de contribution en azote. Autrement dit, l'avantage du précédent arachide sur la réduction des nématodes peut être mesurer par la VRFA comme une contribution en azote. La VRFA de l'arachide est plus élevée parce que le gain probable en rendements dû à la suppression des nématodes est exprimé dans la VRFA comme un effet azote.

La VRFA donnerait une mesure plus précise de l'effet azote de l'arachide si toute la biomasse de la légumineuse était recyclée dans le sol. La quantité d'azote organique minéralisable sera plus élevée et l'effet azote serait nettement supérieur, diminuant ainsi la marge d'erreur liée aux autres effets de la rotation. C'est d'ailleurs dans cette optique d'enfouissement de la biomasse total de la légumineuse comme engrais vert que la VRFA a été conçue au départ (Hesterman et al., 1986 ; Peoples et Herridg, 1990, Mvondo Awono, 1997). Nous l'avons appliqué dans un contexte où les fanes des légumineuses

sont en grande partie exportés. Malgré tout, les résultats montrent que cette technique est applicable pour estimer les contributions en azote des précédents légumineuses.

En plus de l'azote, les précédents légumineuses augmentent la nutrition phosphatée. Par leurs apports en résidus organiques riches en N et P et la solubilisation du P par leurs exsudats racinaires (Gardener, 1981, Ae et al., 2001) les précédent légumineuses augmentent la nutrition phosphatée du sorgho subséquent de 90% par rapport à la monoculture de sorgho. Ainsi, les légumineuses améliorent à la fois la nutrition en N et P qui sont les deux éléments nutritifs limitant les rendements des cultures au Burkina Faso (Pichot *et al.*, 1981; Bationo et Mokwunye, 1991b; Sédogo *et al.*, 1991), expliquant leur effets positifs sur les rendements.

Les légumineuses influencent différemment la population des nématodes. Le niébé est un hôte favorable, entretenant une forte population de nématodes contrairement à l'arachide qui diminue fortement les nématodes du sol. Si les nématodes étaient le facteur déterminant, le précédent arachide produirait des rendements plus élevés que le précédent niébé. Ces résultats apparemment contradictoires montrent que nématodes affectent très peu les rendement comparativement à la nutrition azotée. Dans la littérature il est généralement admis que les pertes de rendements liés aux nématodes restent en dessous de 6.9% (Sasser et Freckman, 1987) et elles peuvent exceptionnelle atteindre 10% (Sasser et Freckman, 1987 ; Koenning *et al.* 1999).

Même si l'augmentation des rendements du sorgho venant après l'arachide était due à la suppression des nématodes, on ne pouvait espérer qu'un surplus de rendement de 10% au maximum comparativement à la monoculture de sorgho. Pourtant, le précédent arachide augmente les rendements du sorgho de 60 à 70%. On peut déduire qu'au moins 50% des augmentations de rendements proviennent des effets de l'arachide sur la nutrition minérale.

Les rendements sont beaucoup plus sensibles aux éléments nutritifs apportés par les fumures et les facteurs de fertilité liés particulièrement à l'azote et au phosphore sont les plus déterminants. Les résultats agronomiques montrent bien que les rendements du

sorgho augmentent du simple au double avec les applications d'engrais organiques ou minéraux.

Certes, les différents facteurs étudiés influencent à des degrés divers les rendements des cultures et permettent de mettre en évidence le rôles des légumineuses sur la fertilité du sol et les rendements des cultures. Il est malheureusement difficile d'isoler et de quantifier le rôle de chaque facteur sur l'augmentation des rendements. Les interactions incontournables entre les différents facteurs exigeaient à chaque moment la prise en compte des autres facteurs dans l'interprétation de chaque résultat. Cependant, nos résultats montrent que le rôle essentiel des légumineuses dans l'augmentation des rendements des autres cultures s'explique principalement par leur impact sur la fertilité des sols. Par leur capacité à utiliser l'azote de l'atmosphère, elle augmentent l'azote organique recyclé par leurs résidus qui sont riches en azote. À cet effet bénéfique sur le recyclage de l'azote, s'ajoute un effet positif des précédents légumineuses sur l'utilisation de l'engrais azoté et l'absorption du phosphore par le sorgho venant après la légumineuse.

Les résultats des différentes fumures étudiées montrent que l'engrais minéral NPK recommandé ne suffit pas pour atteindre les rendements optimums. La fumure exclusivement minérale acidifie le sol à long terme et les rendements baissent avec le temps. La productivité des systèmes de culture est améliorée par des apports complémentaires d'amendements organiques ou de la dolomie. Sur les sols légèrement acides de Kouaré et Farakô-Ba, les applications annuelles de dolomie ($0,5$ à 1 tonne ha^{-1}), de fumier et autres amendements organiques (3 tonnes ha^{-1}) sont très nécessaires.

Dans les systèmes de rotation utilisant les légumineuses, le phosphate naturel local peut être utiliser le P. Par leur capacité à utiliser le P des phosphates peu solubles, les légumineuses valorisent mieux le phosphate naturel. Par la solubilisation du P et le recyclage de leurs résidus, les légumineuses contribuent indirectement à augmenter la disponibilité du P dans le sol. Comme la dolomie, le phosphate apporte également du calcium utile aux plantes et peut contribuer à neutraliser l'acidité du sol. Ces amendements sont mieux valorisés dans les systèmes de culture comportant des

légumineuses. Le phosphate naturel et la dolomie augmente la production de biomasse et la fixation symbiotique de l'azote, contribuant ainsi à améliorer le bilan de l'azote dans le système. Les amendements organiques neutralisent également l'acidité du sol tout en apportant des éléments nutritifs complémentaires.

Conclusion

Comparativement aux systèmes traditionnels à faible rendement, il existe un potentiel de rendement des cultures qui peut être exploité par une utilisation judicieuse des fumures et des rotations avec les légumineuses pour améliorer la productivité des systèmes traditionnels. Les résultats agronomiques au champ, les mesures et observations sur la fixation symbiotique de l'azote, la disponibilité de l'azote, la nutrition azotée du sorgho succédant aux légumineuses, l'évolution des propriétés chimiques des sols et les nématodes permettent de tirer un certain nombre de conclusions et de faire des recommandations.

Même si les producteurs ne disposent pas d'assez de ressources pour investir dans l'achat des engrais minéraux, ils peuvent augmenter les rendements des céréales en pratiquant les rotations Légumineuses-Céréales.

Les rendements moyens du sorgho dans les champs des producteurs sont de 600 et 800 kg ha⁻¹ dans les zones soudanienne et guinéenne respectivement. En général, les producteurs appliquent très rarement les engrais minéraux sur le sorgho ou quand ils le font, ils utilisent de très faibles doses inférieures à celles recommandées par les services de vulgarisation. La simple rotation biennale avec l'arachide ou le niébé sans aucun apport d'engrais azoté permet de doubler presque le rendement couramment obtenu en milieu paysan. On peut même tripler ce rendement par les rotations en y ajoutant une fertilisation adéquate. Ces résultats suggèrent un certain nombre de recommandations pratiques pour augmenter la productivité des systèmes traditionnels.

Les rotations culturales

La monoculture de sorgho qui est malheureusement pratiquée sur plusieurs années par les producteurs est une contrainte limitant les rendements du sorgho. Même la culture du sorgho sur deux années successives entraîne des pertes de rendements comparativement aux rotations Légumineuse-Sorgho et Jachère annuelle.

La rotation jachère- sorgho est plus performante que la culture continue de sorgho. Elle augmente les rendements de 67% en moyenne par an par rapport à la monoculture de sorgho. Mais sa recommandation exige un examen des avantages et inconvénients possibles. Adopter la pratique de la jachère suppose que le producteur n'a pas de contrainte de disponibilité en terre. Il peut en ce moment laisser une partie de son champ en jachère une année sur deux. Si cette condition n'est pas remplie, il faut trouver une autre alternative. Par contre si la contrainte en terre ne se pose pas, la rotation Jachère-Céréale est préférable à la monoculture. Avec la rotation Jachère-Sorgho, le producteur peut espérer un rendement de 910 kg ha⁻¹. Pour obtenir le même rendement avec la monoculture de sorgho, le producteur doit exploiter 1,67 ha. Il y a donc une économie en intrants et en temps de travaux et la rotation Jachère –Sorgho devient une option intéressante. Mais dans le contexte de l'agriculture du Burkina où la pression démographique entraîne une forte demande en terres, cette technique est difficilement applicable. En plus de cette contrainte majeure, les parcelles des précédents jachères entretiennent un taux d'enherbement très élevé dû à l'enfouissement périodique des graines des mauvaises herbes de la jachère. Cela impose plusieurs sarclages qui augmentent les temps de travaux consacrés à l'entretien des parcelles. On peut se demander si l'économie de ressources sur la superficie exploitée peut compenser les dépenses supplémentaires dues à la gestion des parcelles de jachère. Une étude micro économique permettrait de répondre à cette question.

Les rotations comportant des légumineuses sont incontestablement les plus performantes. Les rendements du sorgho sont presque doublés en zone guinéenne et quadruplés en zone soudanienne quand on pratique les rotation avec les légumineuses. À Farakô-Ba, les rotations tri-annuelle Coton-Arachide-Sorgho et Arachide-Coton-Sorgho sont particulièrement intéressantes. Elle assurent une bonne productivité du système et diminuent les nématodes. Elles méritent d'être proposées dans la zone guinéenne dans les systèmes de culture à base de cotonnier. La rotation Niébé-Sorgho est très performante et peut être recommandée dans les deux zones guinéenne et soudanienne.

L'utilisation des légumineuse dans les systèmes de culture comporte beaucoup d'autres avantages. L'arachide et le niébé sont des cultures de rentes pouvant rapporter des revenus

financiers aux producteurs, leur donnant ainsi les moyens d'acheter les engrais. Les fanes des légumineuses constituent un fourrage pour les animaux. Dans un système de production intégrant l'agriculture et l'élevage, l'utilisation des légumineuses permettra d'améliorer la productivité du système. Au champ, les légumineuses amélioreront la fertilité du sol, entraînant une plus grande production de biomasse. Les fanes des légumineuses serviront à l'alimentation des animaux, produisant un fumier riche en éléments nutritifs. Un tel système permettra un recyclage des éléments nutritifs assurant une gestion durable de la fertilité des sols. Mieux que la pratique traditionnelle de la jachère qui est de moins en moins envisageable avec la forte pression sur les terres cultivables, les légumineuses offrent des alternatives plus intéressantes pour une exploitation continue et à long terme de la fertilité des sols.

La gestion des engrais

Quand les moyens du producteur le permettent, l'utilisation des engrais améliore davantage la productivité des systèmes. Une bonne gestion des engrais organiques et minéraux permet de mieux valoriser cet investissement.

La dose d'engrais azoté actuellement recommandée pour le sorgho (37 kg N ha^{-1}) est effectivement bien adaptée dans la monoculture habituellement pratiquée par les producteurs. Elle permet aux producteurs d'atteindre 800 kg ha^{-1} de sorgho grain dans la zone Soudanienne et 1.2 T ha^{-1} dans la zone Guinéenne. Mais ces rendements baissent très rapidement avec le temps.

Mais si le producteur adopte les rotations Légumineuse-Sorgho, il faut augmenter la dose d'engrais sur le sorgho pour augmenter davantage les rendements afin de mieux exploiter le potentiel de rendement et valoriser l'investissement dans l'engrais. Après un précédent arachide, on peut appliquer 51 kg N ha^{-1} d'engrais azoté sur le sorgho pour espérer un rendement de 1.9 T ha^{-1} de sorgho grain dans la zone Guinéenne. Après un précédent niébé, il faut appliquer 58 kg N ha^{-1} d'engrais azoté pour espérer un rendement de 2.3 T ha^{-1} .

L'engrais minéral NPK recommandé est très utile mais il ne suffit pas pour exploiter tout le potentiel de rendement du sorgho dans les systèmes de rotation Légumineuses-Sorgho. La fumure exclusivement minérale acidifie le sol à long terme. La productivité des systèmes de culture est améliorée par des apports complémentaires d'amendements organiques, la dolomie ou avec le phosphate naturel local qui est une source peu coûteuse de phosphore. Aux doses de P et K recommandées pour le sorgho et d'engrais azoté que nous venons de proposer en fonction des précédents culturaux, on peut préconiser l'utilisation de 3 T ha⁻¹ de fumier ou de 1 T ha⁻¹ de dolomie. Ainsi, dans une rotation biennale Légumineuse-Sorgho, le sol sera amendé une année sur deux soit avec du fumier ou de la dolomie. Avec leur double avantage par les apports d'éléments nutritifs et la neutralisation de l'acidité, le fumier, la dolomie et le phosphate naturel augmenteront la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses utilisées dans les rotations, améliorant davantage le bilan de l'azote dans le système.

Dans ce système de rotation biennale, on peut fertiliser la légumineuse avec une fumure peu coûteuse en utilisant le phosphate naturel. Au lieu des 100 kg ha⁻¹ d'engrais minéral NPK recommandé sur l'arachide et le niébé, on peut réduire par exemple cette dose d'engrais sur les légumineuses. Des tests agronomiques complémentaires devraient permettre de proposer des plans de fertilisation peu coûteuse et accessible aux producteurs en utilisant les rotations avec les légumineuses pour mieux valoriser les amendements organiques et minéraux locaux.

Références bibliographiques

- Abdel-Ghaffar, A. S., H. A. El-Attar, M. H. Halfawi and A. A. Abdel Salam. 1981. Effects of inoculation, nitrogen fertilizer, salinity and water stress on symbiotic fixation by *Vicia faba* and *Phaseolus vulgaris*. In. Biological nitrogen fixation technology for tropical agriculture. Peter H. Graham (ed.). Centro International de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 153 – 159.
- Ae, N., Kato, Y.; Shen, R. F.; Magno, B., Horst; W. J., Schenk, M. K.; Burkert, A.; Claassen, N.; Flessa, H.; Fromme, W. B.; Goldbach, H.; Olf, H.W and V. Romheld 2001. Identification of phosphorus solubilizing active components (PSAC) from root cell wall or groundnut having better growth on an infertile soil among several legume crops. In: Plant nutrition: food security and sustainability of agro ecosystem through basic and applied research. Fourteenth-Int 2001: 532-533, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands
- Alvey S ; Bagayoko M ; Neumann G ; Buerkert A 2001. Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils. *Plant and Soil*; 2001; 231; 1; p.45-54.
- Andrew, C. S. 1977. Exploiting the Legume/Rhizobium symbiosis in Tropical Agriculture. In: College of Tropical Agriculture Miscellaneous Publication 145. J. M. Vincent, A. S. Whitney and J. Bose eds. University of Hawaii 119-154.
- Anderson, G 1980. Assessing soil organic phosphorous in soil. In F. E. Khasawneh, E. C. Sample and E. J. Kamprath (Eds). *The role of phosphorous in agriculture*, American Society of Agronomy, Madison, Wis. 411-431.
- Ankomah, A. B. 1995. Comparison of methods of estimating biological nitrogen fixation using cowpea cultivars from Ghana. *Tropical Agriculture*. 72 (1), 34-48.
- Arihara, J. and Ohwaki, Y 1989. Estimation of available phosphorous in vertisol and alfisol on view of root effects on rhizosphere soil. In XI Colloquium, Wageningen, Holland.
- Bado, B. V. ; Dakyo, D.; N'Dayegamiye, A.; M. P. Cescas 1993. Effets de la dolomie sur la production et les propriétés chimiques d'un sol ferrallitique. *Agrosol VI* (2) : 22-24.
- Bado, B. V. ; M. P. Sedogo; M. P. Cescas; F. Lompo et A. Bationo 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*. Vol. 6 (6) : 571 – 575.

- Bagayoko, M 1999. Site-specific effects of Cereal/Legume rotation in West Africa : Soil mineral nitrogen, Mycorrhizae and Nematodes. Thèse de doctorat (Ph. D). Université de Hohenheim. Stuttgart, Verlag Grauer GERMANY.
- Bagayoko, M., Buerkert, A., Lung, G., Bationo, A. and V. Römheld 2000. Cereal/legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa : soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nematodes. *Plant and soil* 218 : 103-116.
- Baldock, J. O.; L. R. Higgs; W. H. Paulson; J. A. Jacobs and W. D. Schrader 1981. Legumes and mineral nitrogen effects on crop yields in several crop sequences in the Mississippi Valley. *Agron. J.* 73: 885-890.
- Barrios, E.; Kwesiga, F.; Buresh, R. J.; Sprent, J. J. and R. Coe 1998. Relating pre-season soil nitrogen to maize yield in tree legume-maize rotations. *Soil-Science-Society-of-American-Journal* 62(6): 1604-1609.
- Bationo A., Chien S. H., Mkwunye A. U., 1987. Chemical characteristics and agronomic value of some phosphate rocks in West Africa : In : Food grain production in semi-arid Africa. Meyonga J. M., Bezune H T. and Youndeower A (eds) ; 399-407.
- Bationo A.; B. J. Ndunguru; B. R. Ntare; C. B. Chictianson and A. U. Mkwunye 1991 a. Fertilizer management strategies for legume-based cropping systems in the West African Semi-Arid Tropics. In: Phosphorous nutrition of grain legumes in the semi-arid tropics. Johansen, C., Lee, K.K., and Sahrawat, K. L. eds, 213-226. ICRSAT, Patancheru, A. P. 502324, India.
- Bationo, A. and A. U. Mkwunye 1991 b. Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa: The experience of the Sahel. In: Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa. A. Mkwunye (ed). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 195-215.
- Bationo, A., and A.U. Mkwunye. 1991 c. Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production with special reference to the sahelian and sudanian zones of West Africa. In. Alleviating soil fertility constraints to increase crop production in West Africa. A. U. Mkwunye(Ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Bationo, A., C.L. Biielders, N. van Duivenbooden, A.C. Buerkert, and F. Seyni, 1998 a. The management of nutrients and water in the West African semi-arid tropics. In: Management of Nutrients and Water in Rainfed Arid and Semi-Arid Areas. Proceedings of a Consultants Meeting. FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Vienna, 26-29 May 1997. International Atomic Energy Agency. pp 15-35.

- Bationo, A., Koala, S. et Ayuk, É 1998 b. Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. Cahiers Agricultures vol 7, No 5: 365-371.
- Bationo, A and B. R. Ntare 2000 a. Rotation and nitrogen fertilizer effects on pearl millet, cowpea and groundnut yield and soil chemical properties in a sandy soil in the semi-arid tropics, West Africa. *Journal of agricultural Science* 134 : 277-284.
- Bationo, A. and A. Buerkert 2000 b. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61 : 131-142.
- Baujard, P., Bour, E. et B. Martiny 1995. Incidence des nématodes phytoparasites sur la culture du sorgho dans la zone Sahélienne du Sénégal, Afrique de l'Ouest. *Afro-Asian-Journal of Nematology* 5 : 1, 1-10.
- Berger, M., Belem P. C., Dakouo D., et V. Hien 1987. Le maintien de la fertilité des sols dans l'Ouest du Burkina Faso et la nécessité de l'association agriculture-élevage. *Cot. et Fib. Trop.*; vol.XLII Fasc 3 pp 10.
- Bloem, A. A.and R. O. Barnard 2001. Effect of annual legumes on soil nitrogen and on subsequent yield of maize and grain sorghum. *South-Africa-Journal-of-Plant-and-Soil* 18(2): 56-61.
- Bock, B.R. 1984. Efficient use for nitrogen in cropping systems. Pages 273-294 in, *Nitrogen in crop production*, ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.
- Buerkert, A., Bationo, A. and H. P. Piepho 2001. Efficient phosphorus application strategies for increase crop production in Sub-Saharan West Africa. *Field Crop Research* 72 (1): 1-15.
- Bullock, D. G 1992. Crop rotation. *Critical reviews in Plant Sciences* 11, 309-326.
- Cadisch, G., K. Hairiah and K. E. Giller 2000. Application of the natural abundance technique to measure N₂ fixation in *Arachis hypogaea* grown on an Ultisol. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 48 (1): 31-45.
- Cardwell, K. F. and J. A. Lane, 1995. Effect soils, cropping system and host phenotype on incidence and severity of *Striga gesnerioides* on cowpea in West Africa. *Agriculture-Ecosystems and Environment* 53: 3, 253-262.
- Carsky R J ; Singh B B ; Oyewole B 2001. Contribution of early season cowpea to late season maize in the savanna zone of West Africa. *Biological Agriculture & Horticulture*; 2001; 18; 4; p.303-315.

- Cerrato, M. E. and Blackmer A. M., 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82: 138-143.
- Cescas, M. P 1991. Corrélation et calibration des analyses de sols. Fondements techniques et pratiques eu egard aux recommandations d'engrais. Module 5, Gestion des sols. SLS 19510 section 2 : Éléments nutritifs du plan de fertilisation intégré. Département de sols, Université Laval.
- Chalck, P. M.1998. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotations : a review. *Aust. J. Res.*, 49 : 303-316.
- Chamblee, D. S., H. MaAulife, H, Arango and W. W. Woodhouse 1954. Absorption and utilisation of applied nitrogen by certain forage legumes and grasses as determine by using ^{15}N . In *Agron. Abstr.*American Society of Agronomy , Madison Wisconsin p.27.
- Charpenteau, J. L. 1981. Experiences pluriannuelles sur les rotations culturales. Le point de vue d'un biométriciens. *Agronomie*, 1(1) : 27-30.
- Christianson, C. B. and P. L. G., Vleck 1991. Alleviating soil fertility constraints to food production in West Africa: Efficiency of nitrogen applied to food crops. In: *Alleviating soil fertility constraints to improve crop production in West Africa*, : 45-57. A. Uzo Mokwunye (Ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Coleman, D.C., Malcom Oades, Goro Uehara 1989. Dynamic of soil organic mater. In: *Interactions of soil organic mater and variable-charges clays; Dynamic of soil organic mater in tropical ecosystems* Malcolm Oades et al (éds), University of Hawaii, University of Hawaii.
- Dakora, F. D. 1985. Nodulation and nitrogen fixation by groundnut in amended and unamended field soil in Ghana. In: *Biological fixation in Africa*. Ssali, H. and S. O. Keya (eds). 324- 339. Proceedings of the first conference of the African association for biological nitrogen fixation (AABNF) held in Nairobi, Kenya, 23 to 27 july 1984.
- Danso, S. K. A. 1995. Assessment of biological nitrogen fixation. *Fertilizer research* 42 : 33-41.
- Danso, S. K. A. and I. Papastylianou 1992. Evaluation of nitrogen contribution of legumes to subsequent cereals. *Journal of Agricultural Science* 119: 13-18
- Danso, S. K. A., Hardarson, G. and F. Zapata 1993. Misconceptions and practical problems in use of ^{15}N soil enrichment techniques for estimation N_2 fixation. *Plant and Soil* 152 : 25-52.

- Dart, P. J. and B. A. Krantz 1977. Exploiting the legume/Rhizobium symbiosis in tropical agriculture. In: College of Tropical Agriculture Miscellaneous Publication 145. J. M. Vincent, A. S. Whitney and J. Bose eds. University of Hawaii 119-154.
- Dennis, E. A. 1977. Nodulation and nitrogen fixation of legumes in Ghana. In : Biological fixation of nitrogen in the farming systems of the tropics. Ayanaba, A. and Dart, P. J. eds. Chichester, UK : John Wiley.
- Diop, M. T.; Ndiaye, S.; Mounpotr, D. et T. Mateille 2000. Développement des populations de *Meloidogyne javanica* et de *Scutellonema cavenessis* dans les systèmes de cultures maraîchères au Sénégal. Nematology vol. 2 (5). 535-540.
- Dixon, R. O. D. and C. T., Wheeler 1986. Nitrogen fixation in plants. Blackie. Glasgow. 152P.
- Dommergues, Y. R., and F. Ganry 1986. Biological nitrogen fixation and soil fertility maintenance. In: Management of nitrogen and phosphorous fertilizers in sub-Saharan Africa, A. Uzo Mokuwunye and Paul L. G. Vlek (eds): 33-57. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Dommergues, Y.; Duhaux, E et G. D. Hoang 1999. Les arbres fixateurs d'azote : Caractéristiques fondamentales et rôle dans l'aménagement des écosystèmes méditerranéens et tropicaux. Y. Dommergues (ed.). Édition espaces 34. Paris. 475 p.
- Donald, A. P. ; B. J. Milton and W. F. Ken. 1986. Advantages of the nitrogen-15 dilution technique for the measurements of symbiotic dinitrogen fixation in legumes. In. Field measurement of dinitrogen fixation and denitrification. Hauck, R. D. and R. W. Weaver(ed.) : 11-21. Soil Science Society of America, Inc. Special publication No 18. Madison.
- Ellert, B. H. and J. R. Bettany 1988. Comparison of kinetic models for describing net sulfur and nitrogen mineralization. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1692-1702.
- Ensminger, L. E. and R. W. Pearson. 1957. Uses of macronutrient isotope in soil fertility research. In. Atomic energy and agriculture. Comar, L. C.(éd.). Washington, D.C. 19-47.
- Epstein, E. 1972. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. John Wiley, New York.
- Fauck, R. ; Moureaux C. et C. Thomman 1969. Bilan de l'évolution des sols de Séfa (Dasmance, Sénégal) après 15 années de culture continue. Agron Trop 24 (263-301).
- Feller, C 1993. Organic inputs, soil organic matter and functional soil organic compartments in low-acidity clay soils in tropical zones. In: Soil Organic Matter

Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture. K. Mulongoy and R. Merckx (Eds), John Wiley & Sons, New York. 77-88.

- Fening, J. O.; Dogbe, W. and S. K. A. Danso 2001. Assessment of the potential to improve N fixation by cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in Ghanaian soils. *American Journal of Alternative Agriculture*; 2001; 16; 2; p.57-65.
- Fiedler, F., 1984. The measurement of ^{15}N . In. *Isotopes and radiation in agricultural sciences* Vol1:233-282. Soil-Plant-Water Relations. L'Annunziata and J. O. Legg(ed). Academic Press, London.
- Fixen, P. E and J. H. Grove 1990. Testing soil for phosphorus. In: Westerman R. L (ed). *Soil Testing and Plant analysis*. Maadison: soil Scenced Society of America, 141-180.
- Foth, H. D., 1990. *Fundamentals of soil science*. Henry, D. Foth (ed), John Wiley & sons, New York. 336p.
- Freid, M. et L. A. Dean 1952. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Science*. Vol. 73 :263 – 271.
- Fried, M 1957. Measurement of plant nutrient supply of soil by radioactive isotopes. In. *Atomic energy and agriculture*. Comar, L. C.(éd.). Washington,D.C. 1-17.
- Fried, M. and H. Broeshart 1975. An independent measurement of the amount of nitrogen fixed by a legume crops. *Plant and Soil* 43. 707-711.
- Fried, M. And V. Middleboe 1977. Measurement of amount of nitrogen fixed by a legume crop. *Plant and soil* 47 : 713-715.
- Fried, M. Danso, S. K. A and F. Zapata 1983. The methodology of measurement of N_2 fixation by nonlegumes as inferred from field experiments with legumes. *Canadian Journal of Microbiology*. 19 : 8, 1053-1062.
- Gardener, W. K., Parbery, D. G., Barber, D. A. 1981. Proteoid root morphology and function in *Lapinus albus*. *Plant and soil* 60. 143-147.
- Gauthier, D., H. G. Diem, Y.R. Dommergues and F. Ganry. 1985. Assessment of N_2 fixation by *Casuarina esquisetifolia* inoculated with *Frankia* ORSO21001 using ^{15}N methods. *Soil Biol. Biochem*. 17 : 375-380.
- Gerke, J. 1993 : Phosphate adsorption by humic/Fe-oxide mixtures aged at pH 4 and 7 and by poorly ordered Fe-oxide. *Geoderma*, 59 : 279-288.
- Giller, K. E., J. F. McDonagh, B. Toomsan, V. Limpinuntana, H. F. Cook and H. C. Lee 1995. Legumes in the cropping systems of North-East Thailand. *Proceedings of the*

Third International Conference on Sustainable Agriculture, University of London, UK. Whye College Press, Ashford.

- Goodwin, T. W. and E. I. Mercer 1986. Introduction to plant biochemistry, 2nd Ed. Pergamon Press, New York.
- Hageman, R. H. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. In. Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA, 67-85.
- Hardarson, G. and S. K. A., Danso 1993. Methods for measuring biological nitrogen in grain legumes. *Plant and soil* 152 : 19-23.
- Hardarson, G., Danso, S. K. A. , Zapata, F., and K. Reichardt 1991. Measurement of nitrogen fixation in faba bean at different N fertilizer rates using the ¹⁵N isotope dilution and 'A-value' methods. *Plant and soil*. 131 : (2) 161-168.
- Hardarson, G.; Danso, S. K. A. and F. Zapat 1987. Biological nitrogen fixation in field crops. In *Handbook of plant science in Agriculture*, B. R. Christie (eds), pp 165-192, CRC Press Inc., Boca Raton, F. L.
- Harris, G.H. and O.B. Hesterman. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. *Agron. J.* 82 :129-134.
- Hauck. R.D. 1973. Nitrogen tracers in nitrogen cycle studies-Past and future needs. *J. Environ. Qual.* 2 : 317-327.
- Hauck, R. D. and R. W. Weaver. 1986. Field measurement of dinitrogen fixation and denitrification. Soil Science Society of America, Inc. Special publication No 18. Madison .
- Haynes, R. J 1986. Origin, distribution and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems. In: *Mineral nitrogen in the plant-soil system*. R. J. Haynes(Ed.) 1-15, Academic Press, Orlando.
- Hesterman, O.B., C.C. Sheaffer, D.K. Barnes, W.E. Lueschen and J.H. Ford. 1986. Alfalfa dry-matter and nitrogen response in legume corn rotations. *Agron. J.* 78 :19-23.
- Hesterman, O.B., M.P. Russelle, C.C. Sheaffer, and G.H. Heichel. 1987. Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. *Agron. J.* 79 :726-731.
- Hien, V., 1990: *Pratiques culturales et évolution de la teneur en azote organique utilisable par les cultures dans un sol ferrallitique du Burkina Faso*. Thèse de doctorat; INPL Nancy, 131 P.

- Hoshikawa, K 1990. Significance of legume crops in improving the productivity and stability of cropping systems. Paper presented at the International symposium on the Use of Stable isotopes in Plant Nutrition, Soil fertility and Environment Studies. Vienna, Austria, 1-5 October 1990.
- Houba, V. J. G., Van Der Lee, J. J. and I. Novozamsky 1995. Soil Analysis Procedures, Other Procedures. (Soil and Plant Analysis, part 5B), Syllabus' 1995.
- Keeney, D. R. 1982. Nitrogen availability indices. In Methods of Soil Analysis. Part II. A. L. Page, R. H. Millet & D. R. Keeney (Eds). 2nd Edn, Agronomy Monograph No 9, pp 711-730. Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Khan, M. K. and T. Yoshida 1994. Nitrogen fixation in peanut determined by acetylene reduction method and ¹⁵N-isotope dilution technique. Soil Science and Plant Nutrition 40: 2, 283-291.
- Koenning, S. R.; C. Overstreet; J. W. Noling; P. A. Donald; J. O. Becker and B. A. Fortnum 1999. Survey in crop losses in response to phytoparasitic nematodes in the United States for 1994. Journal of Nematology 31 (45): 587-618.
- Kouyate, Z.; Franzluebbbers-Kathrin; Juo-Anthony, S. R. and R. Hossner-Lloyd 2000. Tillage, crop residue, legume rotation and green manure effects on sorghum and millet yields in the semiarid tropics of Mali. Plant-and-Soil 225 (1-2): 141-151.
- Kucey, R. M. N. 1989. The influence of rate and time of mineral N application on yield and N₂ fixation by field bean. Canadian Journal of Plant Science 69 (2) : 427-436.
- Kurtz, L. T., L. V. Boon, T. R. Peck and R. G. Hoefl 1984. Crop rotation for efficient nitrogen production. In: Nitrogen in crop production, R. D. Hauck (ed), 295-305. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.
- Lamaze, T.; S. Khamis; C. Foyer; J. Farineau; M. H. Valadier et J. F. Morot-Gaudty 1990. Effet d'une limitation en N sur la photosynthèse chez le maïs. In : Physiologie et production du maïs. INRA, Paris, 113-121.
- LaRue, T.A. and T.G. Patterson, 1981. How much nitrogen do legume fix ? Advan. In Agron. 34 : 15-38.
- Layzell, D. B 1990. N₂ fixation, NO₃⁻ reduction and NH₄ assimilation. In: Plant physiology, biochemistry and molecular biology. D. T. Denis and D. H. Turpin(Eds), Longman Scientific & Technical, Singapore, 389-413.
- Mahadev-Pramanick, M. Das and M. Pramanick 200. The effect of fertilizer and organic manure on rice-based cropping sequences in Wets Bengal. Tropical Agriculture 77 (2): 111-113

- Mandimba, G. R. and Y. M. Djondo 1996. Nodulation and yield of *Arachis hypogaea* L. as affected by soil management in Congo. *Biological Agriculture and Horticulture* 12 (4): 339-351.
- McAuliffe, C., Chamblee, H., Huribe-Arango and W. W. Woodhouse 1958. Influence of inorganic nitrogen on nitrogen fixation by legumes as revealed by ^{15}N . *Agron. J.* 55 : 334-337.
- McClellan, G. H. and A. J. D. Notholt 1985. Phosphate deposits of tropical sub-Saharan Africa. In *Management of nitrogen and phosphorus fertilizers in sub-Saharan Africa*. A. Uzo Mokwunye and Paul L. G. Vlek (ed.) Martinus Nijhoff publishers, Dordrecht. 173-223.
- McIntire, J., 1986. Constraints to fertilizer use in sub-Saharan Africa. In: *Management of nitrogen and phosphorous fertilizers in sub-Saharan Africa*, A. Uzo Mokwunye and Paul L. G. Vlek (eds): 33-57. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- McLean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. In *Methods of Soil Analysis. Part II*. A. L. Page, R. H. Millet & D. R. Keeney (Eds). 2nd Edn, Agronomy Monograph No 9, pp 199-223. Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Menzel, R. G. and S. J. Smith 1984. Soil fertility and plant nutrition. In. *Isotopes and radiation in agricultural sciences Vol1 :1-34. Soil-Plant-Water Relations*. L'Annunziata and J. O. Legg(ed). Academic Press, London.
- Moshi, A. O. , Wild, A. and Greenland, D. J. , 1974. Effect of organic matter on the charge and phosphate adsorption characteristics of Kikuya red clay from Kenya. *Geoderma*, 11 : 225-237.
- Mulvaney, R. L. 1992. Mass spectrometry. In *Nitrogen isotope techniques : 11-57*. Knowles, R. and T. H. Blackburn(ed). Academic Press, Inc. London.
- Mvondo Awono, J. P 1997. Fertilisation azotée du maïs-grain(*Zea mays* L.) en rotation avec une luzerne non dormante(*Medicago sativa* L. var. nitro). Thèse de doctorat, université Laval, 194 P.
- Nagarajah, S. , A., Posner M., and J. P. Quirk 1970. Competitive adsorption of phosphate with polygalacturonate and others organic anions on kaolinite and oxide surfaces. *Nature* vol. 228 : 83 –84.
- Ndiaye M A F ; Spencer M M ; Gueye M 2000. Genetic variability in dinitrogen fixation between cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] cultivars determined using the nitrogen-15 isotope dilution technique. *Biology and Fertility of Soils*; 2000; 32; 4; p.318-320.

- Nguyen Xuan Hong 1998. Breeding for high N₂ fixation in groundnut and soybean in Viet Nam. In: Improving yield and nitrogen fixation of grain legumes in the tropics and sub-tropics of Asia. PP: 87-94. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1027. Vienna. PP 57-63.
- Olofintoye, J. A. 1986. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) response to different levels of phosphorous and nitrogen in the Guinea Savanna of Nigeria. *Philippine Agriculturalist* 69 (3): 411-418.
- Oswald, A, and J. K. Ransom 2001. Striga control and improved farm productivity using crop rotation. *Crop Protection* vol 20 (2) : 113-120.
- Pallo, F. J. P 1993. Evolution of soil organic matter in some soils under shifting cultivation practices in Burkina Faso. In: *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture*. K. Mulongoy and R. Merckx (Eds), John Wiley & Sons, New York. 77-88.
- Paré, T., Chalifour, F. P., Bourassa, J and Antoun, H. 1992. Residual effects of faba bean and soybean for a second or third succeeding forage-corn production. *Can. J. Plant Sci.* 73 :495-507.
- Pemberton, I. J 1990. Inheritance of ineffective nodulation in cowpea. *Crop Science* 30 (3) : 568-571.
- Peoples, M. B and D. F. Herridge 1990. Nitrogen fixation by legumes in tropical agriculture. *Advances in Agronomy*, vol 44 (155-223).
- Peoples, M. B and E. T. Crasswell 1992. Biological nitrogen fixation: Investment, Expectation and actual contribution to agriculture. *Plant and Soil* 141: 13-39.
- Peoples , M. P., Herridge, D. F. and J. K. Ladha 1995. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production ? *Plant and Soil* 174: 3-28.
- Phillips, D. A., Jones, M. B. and K. W. Foster 1986. Advantages of the nitrogen-15 dilution technique for field measurements of symbiotic dinitrogen fixation in legumes. *Special Publication of Soil Sci. Soc. Am.* No 18 : 11-21.
- Pichot J., Sédogo M. P., et J. F. Poulain 1981. Évolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence des fumures minérales et organiques. *Agronomie Tropicale* N° 36: 122-133.
- Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de 30 années de recherche et de développement agricoles au sud du sahara. Paris : Agridoc-International. Ministère de la coopération et CIRAD-IRAT. 444p.

- Powel, J. M and Mohamed Saleen 1987. Nitrogen and phosphorous transfer in crop-livestock system in West Africa. *Agric. Syst* 25: 261-277.
- Preston, C. M. 1992. Optical emission spectrometry. In *Nitrogen isotope techniques* : 59-87. Knowles, R. and T. H. Blackburn(ed). Academic Press, Inc. London.
- Reddy , G. M., A. Mapiki, B. R. Singh 1998. Effe ot residual fertilizer N, lime and Bradyrhizobium inoculum on groundnut yield, N uptake and N₂ fixation. *Plant-Science* 48 (2): 91-99.
- Reichmann, S.; Kroschel, J. and J. Sauerborn 1995. Distribution and infestation of striga species in Shinyanga region of Tanzania and evaluation of control methods. Brighton crop protection conference: weeds. Proceedings of an international conference, Brighton, UK, 20-30 November 1995, vol. 1, 151-156.
- Rennie, D. A. and E. A. Paul. 1971. Isotope methodology and techniques in soil-plant nutrition and plant physiology. Department of soil science University of Saskatchewan. Saskatoon, Canada. 142p.
- Rennie, R. J. and D. A. Rennie 1983. Techniques for quantifying N₂ fixation in associations with nonlegumes under field and greenhouse conditions. *Can. J. Micrbiol.* Vol. 29 : 1022-1035.
- Rennie, R. J. 1984. Comparison of N balance and ¹⁵N isotope dilution to quantify N₂ fixation in field-grown legumes. *Agron. J.* 76 : 785-790.
- Rennie, R. J. 1986. Advantages and disadvantages of nitrogen-15 isotope dilution to quantify dinitrogen fixation in field-grown legumes : a critique. In. *Field measurement of dinitrogen fixation and dinitrification*. Hauck, R. D. and R. W. Weaver(ed.) : 43-58. Soil Science Society of America, Inc. Special publication No 18. Madison.
- Rezaul-Karim, S. M.; Islam, N. and Uddin-M-Nizam 1995. The striga problem and its control measures: A review. *International-Journal-of-Tropical-Agriculture* 13 (1-4): 13-23.
- Richard, M. Sayre 1971. Biotic influences in soil environment. In: *Plant Parasitic Nematodes, Vol I*: 235-256. Zuckerman et al. (Éds) Academic Press, New York.
- Riekert, H. F. and G. E. Henshaw 1998. Effect of soybean, cowpea and groundnut rotations on root-knot nematode build-up and infestation of dry-land maize. *African-Crop-Science-Journal* 6: 4(377-383).
- Rusli, I.; A. R. Harun; K. A. Rahman; S. Shamsuddin and K. A. Rahim 1998. Evaluation of yield and N₂ fixation of mutant lines of groundnut in Malaysia. In: *Improving yield and nitrogen fixation of grain legumes in the tropics and sub-tropics of Asia*.

- PP: 87-94. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1027. Vienna. PP 87-94.
- Sama A., 1989. Acidification des sols sous culture : valorisation de la dolomie de Tiara. Mémoire de fin d'étude ISN/IDR/ Université de Ouagadougou pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur du Développement Rural, Option Agronomie ; 79 pp.
- Sanchez, C.A. and A.M. Blackmer. 1988. Recovery of anhydrous ammonia-derived nitrogen-15 during three years of corn production in Iowa. *Agron. J.* 80 : 102-108.
- Sasser, J. N and D. W. Freckman 1987. A world perspective on nematology: The role of the society. In: *Vistas on nematology.*, J. A. Veech and D. W. Dickson (eds), 7-14 Hyattsville, MD: Society of Nematology.
- Sédogo, M. P. 1981. Contribution à l'étude de la valorisation des résidus culturels en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride. Matière organique du sol, nutrition azotée des cultures. Thèse de Docteur Ingénieur, INPL Nancy. 135 P.
- Sédogo, M. P.; Bado, B. V.; Hien, V. et F., Lompo 1991. Utilisation efficace des engrais azotés pour une augmentation de la production vivrière : L'expérience du Burkina Faso. In : *Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa.* A. Mokwunye (ed). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 115-123.
- Sedogo, M. P. 1993. Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Doctorat Es-Sciences. Université National de Côte d'Ivoire. 295 p.
- Seinhorst J.W., 1950. De betekenis van de grond voor het optreden van aantasting door het stengelaaltje (*Ditylenchus dipsaci*, (Kühn) Filipjev). *Tijdschr. Plantenziekten.* 56 : 289-348.
- Seinhorst J.W., 1962. Modifications of the elutriation method for extracting nematodes from soils. *Nematologica.* 8 : 117- 28.
- Senaratne, R. and G. Hardarson. 1988. Estimation of residual N effect of faba bean and pea on to succeeding cereals using ¹⁵N methodology. *Plant and Soil* 100 :81-89.
- Senaratne, R.; D. A. Dayatilake and S. Subasinghe 1998. Study in Sri Lanka on cowpea: N₂ fixation, growth, yield and effects on cereals. In: *Improving yield and nitrogen fixation of grain legumes in the tropics and sub-tropics of Asia.* PP: 87-94. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1027. Vienna. PP 117-129.
- Sharma, S. B. and McDonald, D 1990. Global status of nematode problems of groundnut, pigeonpea, chickpea, sorghum and pearl millet, and suggestion for future work. *Crop Protection* 9. 453-458.

- Sheaffer, C.C., D.K. Barnes, G.H. Heichel, G.C. Martens and W.E. Lueschen. 1988. Seeding year nitrogen and dry matter yields of non dormant and moderately dormant alfalfa. *J. Prod. Agric.* 1 :261-265.
- Shumba, E. M. 1990. Respons of maize in rotation with cowpea to NPK fertilizer in a low rainfall area. *The Zimbabwe-Journal-of-Agricultural-Research.* V 28 (1): 39-45.
- Simard, R. R. and A. N'Dayegamiye 1993. Nitrogen mineralization potential of meadow soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 465-472.
- Singh, B. B. and J. P. Jones 1976. Phosphorus sorption and desorption characteristics as affected by organic residues. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , vol. 40 : 389– 394.
- Singh, L. Adeoye, K. B. and V. Balasubramanian 1985. Crop response to lime and tillage depth in an acid soil at Kano. *Samaru Journal of Agricultural Research* 3 (1-2): 87-94.
- Steel, R.G.D. and J.H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics : A biometrical approach. McGraw-Hill Publishing Co. NY.
- Stevenson J F(ed), 1984. Humus Chemistry, genesis, composition, reactions. John Wiley & son, New York.
- Stevenson, J. F 1986. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley & Sons, New York.
- Stoop, W. A. and J. P. Van Staveren, J.Ph., 1983. Effect of cowpea in cereal rotations on subsequent crop yields under semiarid conditions in Uper Volta. In. *Biological Nitrogen Fixation (BNF) Technology for Tropical Agriculture.* CIAT, Cali Colombia pp : 653-657.
- Stoorvogel, JJ et Smaling E. 1990. Assesment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa, 1983-2000. Vol.1 Main Report 28, DLO The Winang Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, The Netherlands, 137p.
- Subbarao, G. V. , N. Ae and T. Otani 1997. Genotypic variation in iron and aluminium-phosphate solubilizing activity of pigeonpea root exudates under P deficient conditions. *Soil science and plante nutrition*, 43(2), 295-305.
- Swement, G. 1983. La fertilité des systèmes culturaux à base de cotonnier en Côte d'Ivoire. Neuf années d'expérimentation et d'observation multilocales 1973-1982. *Coton et Fibres Tropicales* (supplement No 4). 42 pp.

- Tran, T. S 1994. Efficacité et devenir de l'engrais azoté marqué ^{15}N appliqué à la culture de maïs (*Zea mays* L.). Thèse de Doctorat. Université Laval. 157pp.
- Tran, T. S. ; M. Giroux et M. P. Cescas 1996. Utilisation de l'engrais azoté marqué au ^{15}N par le maïs selon les modes d'application et les doses d'azote. *Canadian Journal of Soil Science* .
- Truong B., Pichot J., Bernard P., 1978. Caractérisation et comparaison des phosphates naturels tricalciques d'Afrique de l'Ouest en vue de leur utilisation directe en Agriculture. *Agron. Trop.*, 33 (2) : 136 - 145.
- Trytsman, M. and M.F Smith 1998. Comparison of methods used for determining nitrogen fixation in annual clovers. *Applied Plant Science* 12: 1, 20-23.
- Tuker, T. C 1984. Diagnostic of nitrogen deficiency in plants. In: *Nitrogen in crop production*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA; 249-262.
- Van Reeuwijk, L. P., 1993. Procedures for Soil Analyses. Technoical Paper No. 9 . Van Fourth Edition. Reeuwijk (ed). International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Van Reuler, H. and W. H. Prins 1993. The role of plant nutrients for sustainable food crop production in Sub-Saharan Africa. H. Van Reuler and W. H. Prins (eds). Ponsen & Looijen, Wageningen.
- Varvel, G. E. and T. A. Peterson 1990. Nitrogen fertilizer recovery by corn in monoculture and rotation systems. *Agron. J.* 82: 935-938.
- Vose, P. B.,1980. Introduction to nuclear techniques in Agronomy and plant Biology. Pergamon Press, Oxford.
- Vose, P. B., A. P. Ruschel, R. L. Victoria, S. M. T. Saito, and E. Matsui. 1981. ^{15}N as a tool in biological nitrogen fixation research. In. *Biological nitrogen fixation technology for tropical agriculture*. Peter H. Graham(ed.). Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia: 575– 592.
- Vose, P. B. and R. L. Victoria. 1986. Re-examination of the limitations of nitrogen-15 dilution technique for the field measurement of dinitrogen fixation. In. *Field measurement of dinitrogen fixation and dinitrification*. Hauck, R. D. and R. W. Weaver(ed.) : 23-41. Soil Science Society of America, Inc. Special publication No 18. Madison.
- Walkley, A.; & Black, J. A. 1934. An examination of the Detjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromatic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.

- Wani, S. P., Rupela, O. P. and K.K. Lee 1995. Sustainable agriculture in the semi-arid tropics through biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant and Soil* 174: 29-49.
- Warembourg, F. R. 1993. Nitrogen fixation in soil and plant systems. In *Nitrogen isotope techniques* : 127-156. Knowles, R. and T. H. Blackburn(ed). Academic Press, Inc. London.
- Weaver, R. W., 1986. Measurement of biological dinitrogen fixation in the field. In. *Field measurement of dinitrogen fixation and dinitrification*. Hauck, R. D. and R. W. Weaver(ed.) : 1-10. Soil Science Society of America, Inc. Special publication No 18. Madison.
- Wey, J et Obaton, M. 1978. Incidences de quelques techniques culturales sur l'activité fixatrice d'azote et le rendement de l'arachide. *Agronomie Tropicale* 33 (2) : 129-135.

ANNEXES

Annexe 1 : Analyse de la variance des effets des fumures et des précédents culturaux sur la production de matière sèche du sorgho (kg ha⁻¹) pendant les 50 premiers jours après le semis en 2001 à Farako-Bâ

	Nombre de jours après semi		
	15	30	50
Fumures			
NPK recommandé	3.89 ^{bc}	64.5 ^c	1272 ^{ab}
NPK+Dolomie	4.94 ^b	128.0 ^b	1132 ^{bc}
PK+Fumier	8.60 ^a	164.0 ^a	1511 ^a
Témoin	3.89 ^{bc}	52.8 ^{cd}	884 ^d
Rotatios culturales			
Coton-Arachide-Sorgho	7.31 ^a	187.0 ^a	1485 ^a
Jachère-Sorgho	3.33 ^c	58.5 ^{bc}	1197 ^{ab}
Sorgho-Sorgho	5.34 ^b	61.6 ^b	917 ^{bc}
Bloc	**	**	ns
Précédent (P)	***	***	*
Fumure (F)	***	***	*
PxF	***	***	ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

Annexe 2 : Analyse combinée de la variance des rendements grains du sorgho (8 années), du cotonnier (6 années) et de l'arachide (6 années) en pourcentage de la somme des carrés (F calculé) de 1994 à 2001 à Farako-Bâ

	Source	ddl	Grain
Sorgho	Bloc	3	66.8 ***
	Rotation (R)	3	93.4 ***
	Fumure (F)	7	68.9 ***
	Année (A)	7	213.8 ***
	R x F	21	1.3 ns
	R x A	21	4.4 ***
	F x A	49	2.3 ***
	R x F x A	147	0.5 ns
	Source	ddl	Coton grain
Coton	Bloc	3	29.5 **
	Rotation (R)	1	9.7 **
	Fumure (F)	7	34.2 **
	Année (A)	5	227.3 **
	R x F	7	0.4 ns
	R x A	5	2.8 *
	F x A	35	1.3 ns
	R x F x A	35	0.8 ns
	Source	ddl	Graine
Arachide	Bloc	3	37.2 **
	Rotation (R)	2	0.7 ns
	Fumure (F)	7	23.4 **
	Année (A)	5	854.7 **
	R x F	14	0.5 ns
	R x A	10	2.7 **
	F x A	35	1.9 **
	R x F x A	70	0.6 ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

Annexe 3 : Analyse de variances des effets des rotations culturales et des fumures sur les rendements grains et biomasse totale du sorgho pendant huit années (1993 à 2001) en pourcentage de la somme des carrés (F calculé) : site de Farakô-Ba.

	Source	ddl	Années								
			1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Rendements Grain	Bloc	3	19.9**	11.9**	6.1***	18.5**	14.1**	20.6**	14.8**	25.4**	23.5***
	Rotas(R)	3	-	58.4**	9.2***	29.8**	29.9**	38.5**	14.9**	29.7**	72.6***
	Fum(F)	7	7.0**	13.3**	15.9***	17.8**	5.3**	10.5**	11.0**	14.0**	36.7***
	RxF	21	-	0.4 ns	0.7 ns	0.5 ns	0.8 ns	0.8 ns	0.8 ns	0.7 ns	1.6*
Biomasse Totale	Bloc	3	9.1**	9.5**	2.7***	dm	dm	15.2**	21.8**	7.6**	5.8***
	Rotas(R)	3	-	104.6**	48.6***	dm	dm	101.9**	42.2**	52.0**	121.9***
	Fum(F)	7	10.6**	11.2**	18.1***	dm	dm	27.4**	22.1**	24.5**	50.8***
	RxF	21	-	0.4 ns	0.7	dm	dm	1.8*	1.3 ns	0.9 ns	2.5***

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$) ; dm : données manquantes

Annexe 4 : Analyse de variances des effets des fumures de la rotation sur les rendements en grain et tige du sorgho pendant sept années (1994 à 2000) en pourcentage de la somme des carrés (F calculé) à Kouaré

		Années						
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Grain	Bloc	0.4 ns	2.7 ns	5.2***	7.6***	4.8**	6.6**	4.5*
	Rotations (R)	21.4***	10.3 ***	16.1***	10.7***	5.7**	11.8***	10.6***
	Fumures (F)	6.8***	7.7 ***	19.0***	20.7***	9.0***	23.1***	14.5***
	RxF	1.1 ns	0.9 ns	1.9 ns	1.2 ns	1.7 ns	0.9 ns	1.2 ns
Tiges	Bloc	1.0 ns	9.5***	3.2 *	4.8**	2.6*	13.8***	0.8 ns
	Rotations (R)	9.3**	25.5***	18.9***	2.7 ns	6.4***	8.9***	12.3***
	Fumures (F)	10.2***	19.0***	17.1***	21.5***	17.0***	26.8***	40.7***
	RxF	0.8 ns	0.5 ns	1.2 ns	1.0 ns	0.8 ns	1.1 ns	0.7ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00
 ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Annexe 5 : Effets des fumures minérales et organiques sur les rendements du cotonnier pendant 6 années à Farako-Bâ (kg ha⁻¹)

Fumures	Années						
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
NPK recommandé	1371 ^d	1356 ^{abcd}	1079 ^{de}	209 ^{de}	599 ^{cde}	1302 ^{ef}	189 ^d
NPK+Dolomie	1648 ^a	1439 ^a	1392 ^a	457 ^a	941 ^a	1847 ^{ab}	1768 ^{ab}
NPK+Résidus	1579 ^{ab}	1375 ^{abc}	1229 ^b	238 ^d	624 ^c	1479 ^{cd}	1320 ^d
PK	1083 ^{efg}	998 ^{fg}	814 ^g	114 ^g	449 ^{fg}	1183 ^{fg}	931 ^{efg}
PK+Compost	1342 ^{de}	1171 ^e	1124 ^{bcd}	288 ^b	612 ^{cd}	1671 ^{abc}	1519 ^c
PK+Fumier	1567 ^{abc}	1408 ^{ab}	1209 ^{bc}	285 ^{bc}	751 ^b	1859 ^a	1872 ^a
PK+Résidus	1180 ^{ef}	1082 ^{ef}	923 ^f	166 ^f	453 ^f	1337 ^{cde}	1066 ^{ef}
Témoin	869 ^h	784 ^h	739 ^{gh}	108 ^{gh}	413 ^{fgh}	1024 ^{gh}	626 ^h

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

Annexe 6 : Effets des rotations sur les rendements du cotonnier pendant 7 années à Farako-Bâ

		Années						
	Rotations	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Coton	Cot-Ara-Sorgho	1308	1113 ^b	1089	244	505	1399	1379
Graine	Ara-Cot-Sorgho	1352	1290 ^a	1038	223	705	1526	1353
Kg/ha	Bloc	***	***	*	***	***	*	ns
	Rotation (R)	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
	Fumure (F)	***	***	***	***	***	***	***
	RxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Tige	Cot-Ara-Sorg	2945	^{dm}	1760 ^a	1241 ^a	869 ^b	1422
Kg ha-1	Ara-Cot -Sorg	2777	^{dm}	1607 ^b	995 ^b	1449 ^a	1505	1973
	Bloc	***	^{dm}	***	***	***	***	***
	Rotation (R)	ns	^{dm}	*	***	***	ns	ns
	Fumure (F)	***	^{dm}	***	***	***	***	***
	RxF	Ns	^{dm}	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$, selon le test de Fisher

^{dm} : données manquantes

Annexe 7 : Analyse de variances des effets des rotations culturales et des fumures sur les rendements en coton graine et tige du cotonnier pendant huit années (1993 à 2000) en pourcentage de la somme des carrés (F calculé) : site de Farako-bâ

		Années								
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Coton graine	Bloc	-	6.7***	11.2***	7.2***	4.1*	11.2***	14.4***	4.1*	2.6 ns
	Rotas(R)	-	0.3 ns	0.3 ns	9.5**	1.9 ns	1.2 ns	22.5***	1.9 ns	6.1**
	Fum(F)	-	1.7 ns	5.9***	8.3***	19.0***	17.6***	8.9***	5.5***	16.2***
	RxF	-	0.8 ns	0.5 ns	0.5 ns	0.7 ns	1.0 ns	0.3 ns	1.1 ns	0.7 ns
Coton tige	Bloc	14.1***	20.8***	13.0***	-	5.7**	18.3***	7.4***	10.1***	31.5***
	Rotas(R)	-	2.2 ns	1.0 ns	-	5.0*	8.4***	22.8***	0.9 ns	9.1***
	Fum(F)	2.8 *	6.7***	8.0***	-	26.6***	7.7***	7.9***	11.6***	25.0***
	RxF	-	0.5 ns	0.3 ns	-	0.5 ns	0.8 ns	0.6 ns	0.9 ns	0.8 ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00
 ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Annexe 8 : Analyse de variances des effets des rotations culturales et des fumures sur les rendements grain et fanes de l'arachide pendant huit années (1993 à 2000) en pourcentage de la somme des carrés (F calculé) : site de Farako-Bâ.

		Années								
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Rendement grain	Bloc	2.3 ns	3.3*	9.4***	10.4***	6.9***	16.1***	2.7 ns	4.9**	10.8***
	Rotas(R)	-	0.7 ns	3.5*	0.1 ns	0.1 ns	4.4*	4.6*	5.3**	13.0***
	Fum(F)	0.8 ns	1.7 ns	8.8***	2.2*	4.0**	6.7***	7.0***	5.2***	2.8*
	RxF	-	0.6 ns	0.6 ns	0.8 ns	0.3 ns	0.9 ns	0.5 ns	1.0 ns	0.5 ns
Rendements Fanes	Bloc	1.8 ns	1.0 ns	16.0***	5.0**	-	12.7***	2.5 ns	0.5 ns	7.0***
	Rotas(R)	-	3.7*	1.4 ns	10.6***	-	5.2**	6.5**	1.3 ns	8.5**
	Fum(F)	2.2*	3.3**	1.7 ns	20.2***	-	6.5***	18.0***	9.9***	7.9***
	RxF	-	0.4 ns	1.0 ns	0.6 ns	-	0.4 ns	1.1 ns	0.6 ns	0.5 ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00
 ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Annexe 9 : Analyse de variances des effets des fumures sur les rendements en grain et fanes du niébé pendant sept années (1994 à 2000) en pourcentage de la somme des carrés (F calculé) : site de Kouaré

		Années						
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Graine	Bloc	2.3 ns	8.7**	1.0 ns	0.3 ns	2.7 ns	0.1 ns	7.9**
	Rotation(R)	1.9 ns	81.2***	70.0***	176.0***	158.0**	73.1***	54.6***
	Fumure (F)	3.4 *	5.3**	10.6***	20.2***	4.9 **	7.0***	2.7*
	RxF		1.9 ns	4.9*	12.5***	2.6*	2.4	1.5 ns
Fane	Bloc	1.0 ns	2.2 ns	2.0 ns	1.7 ns	4.0*	0.8 ns	1.4 ns
	Rotas(R)	0.2 ns	62.5***	5.5*	0.3 ns	144.1**	30.6***	42.6***
	Fum(F)	6.8 **	18.6***	2.8 ns	3.5 *	4.4**	0.5 ns	2.3 ns
	RxF	0.3 ns	7.0*	3.6*	0.3 ns	2.5 ns	0.3 ns	1.3 ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Annexe 10 : Effets des fumures sur les rendements de l'arachide (kg ha⁻¹) pendant 9 années à Farako-bâ.

		Années								
Fumures		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Graines Kg ha ⁻¹	NPK recommandé	673 ^a	1114 ^{cde}	1649 ^{ef}	437 ^{bc}	678 ^{cde}	509 ^{efg}	83 ^g	601 ^{def}	912 ^d
	NPK+Dolomie	672 ^{ab}	1244 ^a	1895 ^a	539 ^a	956 ^{ab}	696 ^a	204 ^a	824 ^a	967 ^{bc}
	NPK+Résidus	653 ^{abc}	1155 ^{bc}	1760 ^{cd}	497 ^{ab}	778 ^c	576 ^d	123 ^{de}	648 ^d	896 ^{de}
	PK	634 ^{abc}	1114 ^{cde}	1481 ^g	473 ^{abc}	775 ^c	528 ^{def}	117 ^{def}	609 ^{def}	968 ^{bc}
	PK+Compost	544 ^{cde}	1259 ^a	1775 ^{bc}	521 ^a	988 ^a	644 ^{abc}	151 ^{bc}	798 ^{abc}	1002 ^b
	PK+Fumier	586 ^{bcd}	1216 ^{ab}	1821 ^{ab}	530 ^a	947 ^{ab}	676 ^{ab}	165 ^b	811 ^{ab}	1184 ^a
	PK+Résidus	547 ^{cde}	1137 ^{bcd}	1688 ^{de}	521 ^a	704 ^{cd}	560 ^{de}	130 ^d	616 ^{de}	880 ^{def}
	Témoin	588 ^{bcd}	1015 ^f	1316 ^h	375 ^d	651 ^{def}	421 ^h	115 ^{def}	507 ^g	685 ^g
Fanes Kg ha ⁻¹	NPK recommandé	3643 ^{bc}	3411 ^{bcd}	4262 ^{abc}	1867 ^{ef}	dm	1242 ^{de}	555 ^g	2322 ^e	2412 ^{cd}
	NPK+Dolomie	3687 ^b	3525 ^b	4335 ^a	2771 ^{ab}	dm	1784 ^a	1457 ^a	3097 ^{ab}	2914 ^{ab}
	NPK+Résidus	3648 ^{bc}	3483 ^{cde}	3949 ^{cd}	2321 ^d	dm	1285 ^d	783 ^{def}	2668 ^{cd}	2173 ^e
	PK	3405 ^{efg}	3149 ^{cde}	3885 ^{def}	1754 ^{fgh}	dm	1118 ^{efg}	829 ^{de}	2130 ^{ef}	2040 ^{efg}
	PK+Compost	3582 ^{cde}	3742 ^a	3923 ^{de}	2556 ^c	dm	1497 ^c	1129 ^{bc}	2759 ^c	2573 ^c
	PK+Fumier	4155 ^a	3733 ^a	4321 ^{ab}	2843 ^a	dm	1708 ^{ab}	1193 ^b	3212 ^a	3035 ^a
	PK+Résidus	3481 ^{def}	2923 ^{fg}	3870 ^{efg}	2011 ^{de}	dm	1133 ^{def}	944 ^d	2079 ^{efg}	2105 ^{ef}
	Témoin	3279 ^{fgh}	3024 ^f	3548 ^{gh}	1848 ^{fg}	dm	1077 ^{fgh}	839 ^{de}	1826 ^{fgh}	1730 ^h

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00
ns : Non significatif ($p > 0.05$) ; dm : données manquantes

Annexe 11 : Effets des rotations sur les rendements de l'arachide (kg ha⁻¹) pendant 7 années à Farakô-Ba

		Années							
Rotations		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Grain Kg ha ⁻¹	Arachide-Arachide	1185	1748 ^a	484	823	525 ^c	117 ^c	594 ^c	726 ^c
	Coton-Arachide-Sorgho	1161	1670 ^b	482	812	591 ^{ab}	153 ^a	702 ^{ab}	1042 ^a
	Arachide-Coton -Sorgho	1124	1601 ^{bc}	494	793	612 ^a	138 ^{ab}	7343 ^a	1035 ^{ab}
	Bloc	*	***	***	***	***	ns	**	***
	Rotation (R)	ns	*	ns	ns	*	*	**	***
	Fumure (F)	ns	***	*	**	***	***	***	*
	RxF	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fanes Kg ha ⁻¹	Arachide-Arachide	3159 ^c	3842 ^{abc}	2196 ^b	dm	1242 ^{bc}	846 ^c	2397 ^c	1060 ^c
	Coton-Arachide-Sorgho	3561 ^a	4128 ^a	2460 ^a	dm	1298 ^b	1027 ^a	2619 ^a	2614 ^a
	Arachide-Coton -Sorgho	3401 ^{ab}	4064 ^{ab}	2083 ^{bc}	dm	1527 ^a	1025 ^{ab}	2518 ^{ab}	2445 ^{ab}
	Bloc	ns	***	**	dm	***	ns	ns	***
	Rotation (R)	*	ns	***	dm	**	**	ns	***
	Fumure (F)	**	ns	***	dm	***	***	***	***
	RxF	ns	ns	ns	dm	ns	ns	ns	ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$

dm : données manquantes

Annexe 12 : Effets des fumures sur les rendements du niébé pendant 7 années à Kouaré

Fumures		Années						
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Graines Kg ha ⁻¹	NPK+Résidus	216 ^d	422 ^{bc}	681 ^a	638 ^b	535 ^b	138 ^{cd}	391 ^b
	NPK recommandé	162 ^{ef}	704 ^a	453 ^b	1101 ^a	450 ^{cd}	119 ^{de}	394 ^b
	NPK+Dolomie	261 ^{ab}	427 ^b	390 ^{de}	682 ^b	428 ^{de}	146 ^c	483 ^a
	PK+Fumier	244 ^{abc}	420 ^{bc}	418 ^{cd}	699 ^b	633 ^a	214 ^a	362 ^{bc}
	PK+Résidus	275 ^a	383 ^{cd}	424 ^{bc}	667 ^b	476 ^c	198 ^{ab}	339 ^{bcd}
	Témoin	165 ^e	203 ^e	141 ^f	306 ^c	281 ^f	54 ^f	200 ^e
Fanes Kg ha ⁻¹	NPK+Résidus	440 ^{ab}	1108 ^{cd}	993 ^{bc}	1420 ^b	814 ^{bcd}	548 ^{bc}	1060 ^a
	NPK recommandé	175 ^{de}	1325 ^{ab}	1383 ^a	2400 ^a	901 ^{ab}	581 ^{bc}	1036 ^{ab}
	NPK+Dolomie	505 ^a	1480 ^a	993 ^{bc}	1369 ^{bc}	851 ^{bc}	732 ^{ab}	988 ^{abc}
	PK+Fumier	391 ^{abc}	1171 ^c	1115 ^b	1420 ^b	984 ^a	867 ^a	823 ^{abc}
	PK+Résidus	496 ^a	1106 ^{cd}	895 ^d	1412 ^{bc}	777 ^{cd}	560 ^{bc}	998 ^{abc}
	Témoin	212 ^d	455 ^e	578 ^e	499 ^d	445 ^e	553 ^{bc}	486 ^d

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$

Annexe 13 : Effets des fumures et des rotations culturales sur l'azote minéral du sol pendant les 44 premiers jours après le semis du sorgho à Farako-Bâ en 2001

	Nombre de jours après semis				
	1	8	15	29	44
Rotations culturales					
Arachide-Cotonnier-Sorgho	7.5 bc	6.5 b	6.5	6.3	2.4 b
Cotonnier-Arachide-Sorgho	9.2 a	8.7 a	8.1	7.3	2.1 bc
Jachère-Sorgho	8.3 b	7.8 ab	8.0	6.7	3.4 a
Sorgho-Sorgho	6.8 cd	6.0 bc	6.5	6.3	1.9 bcd
Jachère continue	5.4	3.6	2.0	3.9	4.0
Fumures					
NPK recommandé	8.3 b	8.0	7.4	8.0 ab	2.3
NPK+Dolomie	6.9 d	6.9	6.6	7.6 abc	2.3
NPK+Résidus	9.7 a	7.7	7.1	8.4 a	2.5
PK+Fumier	8.0 bc	7.0	8.3	5.6 d	2.9
Témoin	6.6 de	6.7	7.1	3.6 e	2.2
Bloc	***	***	ns	***	ns
Précédent (P)	***	***	ns	ns	***
Fumure (F)	***	ns	ns	***	ns
PxF	***	**	ns	ns	ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$

Annexe 14 : Analyse de variances des effets des précédents culturaux et des fumures sur l'infection du sol et des racines du sorgho par les nématodes 30 jours après semis à Farakô-Ba

		Nématodes					
		ddl	Pratylenchus	Scutellonema	Helycotylenchus	Trichodorus	Total
Sol (Nb/dm ³)	Bloc	2	4.3 *	1.9 ns	0.4 ns	2.0 ns	0.005 ns
	Précédent (P)	2	47.0 **	32.9 **		11.2 **	61.3 **
	Fumure (F)	3	1.3 ns	2.0 ns	43.3 **	0.5 ns	0.2 ns
	PxF	6	1.3 ns	0.8 ns	1.0 ns	0.9 ns	0.7 ns
	Erreur	22					
Racine (Nb/g)	Bloc	2	2.6 ns	1.1 ns	ab	ab	2.3 ns
	Rotas(R)	2	22.2 **	13.7 **	ab	ab	25.7 **
	Fum(F)	3	0.5 ns	0.1 ns	ab	ab	0.3 ns
	RxF	6	0.6 ns	0.7 ns	ab	ab	0.9 ns
	Erreur	22					

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00
 ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Annexe 15 : Analyse de variances des effets des précédents culturaux et des fumures sur l'infestation du sol et des racines du sorgho subséquent au 90^e jour après le semis à Farakô-Ba.

		Nématodes					
		ddl	Pratylenchus	Scutellonema	Helycotylenchus	Tylench	Total
Sol (Nb/dm ³)	Bloc	2	0.03 ns	2.8 ns	0.05 ns	6.2 **	0.8 ns
	Précédent (P)	2	10.1 **	24.4 **	14.2 **	0.3 ns	24.4 **
	Fumure (F)	3	0.2 ns	0.8 ns	1.4 ns	0.8	0.4 ns
	PxF	6	0.6 ns	0.2 ns	1.2 ns	0.6 ns	1.2 ns
	Erreur	22					
Racine (Nb/g)	Bloc	2	2.2 ns	ab	ab	nm	nm
	Rotas(R)	2	12.5 **	ab	ab	nm	nm
	Fum(F)	3	0.9 ns	ab	ab	nm	nm
	RxF	6	0.7ns	ab	ab	nm	nm
	Erreur	22					

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00
 ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Annexe 16 : Influence direct des précédents culturaux sur l'infection du sol par les nématodes à 30 et 90 jours après semis à Farako-Bâ

		Nématodes				
		Pratylenchus	Scutellonema	Helycotylenchus	Trychodorus	Total
30 Jours après semis	Arachide	5 c	130 c	97 c	62 b	158 c
	Niébé	157 ab	1138 ab	3157 a	55 bc	3212 a
	sorgho	175 a	1228 a	843 b	377 a	1220 b
	Bloc	*	ns	ns	ns	ns
	Précédent (P)	**	**	**	**	**
	Fumure (F)	ns	ns	ns	ns	ns
	PxF	ns	ns	ns	ns	ns
90 Jours après semis	Arachide	53 c	135 c	510 c	207	905 c
	Niébé	518 a	1213 a	3532 a	618	5880 a
	sorgho	407 ab	940 ab	1892 b	122	3360 b
	Bloc	ns	ns	ns	**	ns
	Précédent (P)	**	**	**	ns	**
	Fumure (F)	ns	ns	ns	ns	ns
	PxF	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$

Annexe 17 : Influence direct des précédents culturaux et des fumures sur l'infection des racines du sorgho par les nématodes 30 jours après le semis à Farako-Bâ

		Pratylenchus	Scutellonema	Total
30 Jours après semis	Arachide	8 c	4 c	12 ^c
	Niébé	389 ^a	60 ^{ab}	449 ^a
	sorgho	160 ^{ab}	72 ^a	232 ^{ab}
	Bloc	*	ns	ns
	Précédent (P)	**	*	**
	Fumure (F)	ns	ns	ns
	PxF	ns	ns	ns
90 Jours après semis	Arachide	4 c	0	4 c
	Niébé	109 ^a	0	109 ^a
	sorgho	69 ^{ab}	0	69 ^{ab}
	Bloc	**	-	ns
	Précédent (P)	**	-	**
	Fumure (F)	ns	-	ns
	PxF	ns	-	ns

*, **, *** : significatifs au seuil de probabilité de 0.05 ; 0.01 et 0.00

ns : Non significatif ($p > 0.05$)

Les chiffres portant une même lettre dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0.05$