



La fixation d'azote du niébé au Sénégal est affectée par la gestion de la fertilisation organique des champs et les variétés

Médoune MBENGUE ^{1,2,3,4} ; Saliou FALL ^{3,4} ; Ibrahima DIEDHIOU ^{1,3} ; Laurent COURNAC ^{2,3} ; Cathy CLERMONT-DAUPHIN ^{*2,3}

¹ Université de Thiès, ED2DS, Thiès, Sénégal

² Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, 2 Place Viala 34060, Montpellier, France

³ Laboratoire Mixte International sur l'Intensification Ecologique des Sols Cultivés en Afrique de L'Ouest, Dakar, Sénégal

⁴ Institut Sénégalais de Recherches Agricoles, LNRPV, Dakar, Sénégal

Correspondance : cathy.clermont@ird.fr

Résumé

Les légumineuses comme le niébé (*Vigna unguiculata*) contribuent à la durabilité des systèmes agricoles en Afrique subsaharienne par leurs bénéfices économiques, écologiques et nutritionnels. Un des processus majeurs à la base de ces bénéfices est leur capacité à fixer l'azote atmosphérique via leur relation symbiotique avec des bactéries présentes dans le sol. Cette étude a évalué la fixation d'azote de deux variétés de niébé, une locale et une améliorée, en utilisant la méthode d'abondance naturelle en ¹⁵N sur 6 champs d'agriculteurs soit régulièrement, soit rarement amendés en fumier de ferme. Les résultats ont indiqué que la variété locale de niébé en champs amendés a fixé au stade floraison 40.5 kg ha⁻¹ d'N en provenance de l'atmosphère et assimilé au total 71.8 kg ha⁻¹ d'N en moyenne. Ces valeurs sont significativement plus élevées que dans les autres traitements. Cela n'est pas dû aux % Nd_{fa}, qui sont d'ailleurs en moyenne plus faibles dans cette situation (Nd_{fa} = 61 %), mais plutôt aux quantités plus élevées de biomasses produites par la variété locale en champs amendés. La forte production de biomasse de la variété locale a entraîné une forte compétition du niébé sur le mil associé. Ces résultats mettent en lumière l'intérêt des amendements organiques et des variétés pour l'amélioration de la fixation d'azote du niébé. Ils éclairent aussi la logique du choix des agriculteurs pour la variété Baye Gagne semée à une densité plus faible que celle de l'étude. Ils suggèrent aussi l'évaluation des variétés de niébé ne peut pas se limiter à un seul critère dans un contexte aussi complexe que l'agriculture familiale subsaharienne.

Mots-clés : Azote atmosphérique, légumineuse, abondance naturelle en ¹⁵N, Afrique subsaharienne, champs de case, champs de brousse, association mil-niébé

Abstract: Nitrogen fixation of cowpea in Senegal is affected by organic fertilization management and varieties.

Legumes such as cowpea (*Vigna unguiculata*) contribute to the sustainability of agricultural systems in sub-Saharan Africa through their economic, ecological, and nutritional benefits. A major process underlying these benefits is their ability to fix atmospheric nitrogen through their symbiotic relationship with soil bacteria. This study evaluated nitrogen fixation of two cowpea varieties, a local and an improved one, using the natural abundance of ¹⁵N method on 6 farmers' fields, either regularly or rarely amended with farmyard manure. Results showed that the local cowpea variety grown in amended fields fixed 40.5 kg ha⁻¹ of N from the atmosphere and assimilated a total of 71.8 kg ha⁻¹ on average. These values were significantly higher than in other treatments. This was not due to % Nd_{fa}, which were actually lower in this situation (Nd_{fa} = 61 %), but rather to the larger amounts of biomass produced by the local cowpea in amended fields. The high biomass production of the local variety led to strong competition from cowpea on the associated millet. These results highlight the importance of organic amendments and varieties for improving nitrogen fixation in cowpea. They also explain why farmers choose the 'Baye Ngagne' variety



at a lower seeding rate than in the study. Additionally, they suggest that evaluating cowpea varieties cannot be limited to a single criterion in such a complex context as Sub-Saharan African family farming.

Keywords : Biological nitrogen, legume, natural abundance in ^{15}N , sub-Saharan Africa, homefields, outfields, variety, millet-cowpea intercropping

1. Introduction

Les légumineuses sont les principales cultures de diversification aux céréales en zone sub-saharienne. Elles ont des atouts tant économiques qu'écologiques. Les récoltes sont utilisées à la fois pour l'alimentation humaine, celle du bétail et pour l'acquisition de revenus. La capacité de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique d'une légumineuse comme le niébé en zone subsaharienne peut représenter jusqu'à 96 % de ses besoins en N (Namatsheve et al., 2020). En couvrant rapidement le sol, les variétés rampantes permettent de réduire le risque d'érosion des sols et de développement d'adventices (Kocira et al., 2020 ; Zougmore et al., 2000). Les légumineuses favorisent la flore fongique du sol, notamment les mycorhizes et leurs services en termes d'efficacité d'utilisation du phosphore et de l'eau du sol (Tang et al., 2022 ; Alvey et al., 2001). Les légumineuses participent aussi à la régulation naturelle des bioagresseurs des céréales cultivées en rotation ou en association avec elles (Franke et al., 2018).

Cependant, la culture de légumineuses ne garantit pas à elle seule le développement de ses services écologiques. Ainsi, la fixation symbiotique d'azote des légumineuses et sa contribution au recyclage de l'azote dans les agrosystèmes peuvent être significativement influencées par les conditions d'humidité des sols (Munjonji et al., 2018), leurs teneurs en éléments mineurs (Bonilla & Bolaños 2009), les fertilisations azotées et phosphatées (Franke et al., 2018), le chaulage (Costa et al., 2023), les associations de cultures (Namatsheve et al., 2020 ; Binacchi et al., 2022), la gestion des maladies (Rathjen et al., 2020), le labour et la gestion des résidus de culture (Franke et al., 2018 ; Binacchi et al., 2022). Les capacités de fixation d'N des légumineuses varient aussi fortement d'une espèce et d'une variété à l'autre (Fall et al., 2003 ; Bado et al., 2018). Afin d'optimiser la fixation d'azote des légumineuses, il est donc crucial d'identifier les facteurs qui limitent ce processus, en sachant que ces facteurs peuvent varier en fonction à la fois des conditions environnementales, des pratiques culturales et des espèces et variétés.

Au Sénégal, le niébé (*Vigna unguiculata*) est une culture en pleine expansion (FAOSTAT, 2023), souvent cultivée en association avec le mil, sous régime pluvial, et en utilisant peu d'intrants (Mbengue et al., 2024). Les résultats disponibles montrent que cette légumineuse est plus résistante à la sécheresse (Halilou et al., 2015) et possède une activité fixatrice d'azote plus importante que l'arachide (Bado et al., 2007 ; Hamidou et al., 2018). Parmi les facteurs susceptibles d'affecter la fixation symbiotique d'azote de cette légumineuse dans le bassin arachidier sénégalais, la fertilité des sols est probablement l'un des plus importants. Les différences de niveau de fertilité des sols y sont en grande partie liées à l'hétérogénéité des pratiques de fertilisation organique (Toukara et al., 2020). Alors que les champs proches reçoivent des apports de fumiers quasiment tous les ans ou tous les deux ans, les champs de brousse en sont généralement privés. Un autre facteur majeur de variation de la fixation symbiotique d'azote du niébé pourrait être les variétés (Fall et al., 2003 ; Bado et al., 2018). Les programmes de sélection ont permis de développer des variétés à cycle plus court que la plupart des variétés locales, mais peu de références sont disponibles sur leurs niveaux de fixation symbiotique d'N dans les conditions des parcelles d'agriculteurs et en comparaison des variétés locales. Cette lacune rend difficile la formulation de conseils pertinents aux agriculteurs en matière de choix variétal.

De nombreuses techniques existent pour l'évaluation quantitative de la fixation biologique d'azote des légumineuses (Herridge et al., 2008). De toutes ces méthodes, celle d'abondance naturelle en ^{15}N attire particulièrement l'attention. Cette méthode s'appuie sur les différences d'abondance naturelle en ^{15}N entre l'N qui se trouve dans l'atmosphère et celui dans le sol. Elle est donc plus facile à mettre en œuvre



que celle plus précise du marquage ^{15}N , car elle ne nécessite pas d'intervention humaine pour apporter l' N marqué. De plus, elle a l'avantage de pouvoir intégrer une grande partie du cycle de la culture dans l'évaluation (Herridge et al., 2008 ; Bado et al., 2018). Cette méthode a été utilisée avec succès dans le contexte de la culture du niébé en zone subsaharienne (Namatsheve et al., 2020).

L'objectif de cet article est 1) de quantifier, par la méthode d'abondance naturelle en ^{15}N , la fixation d'azote et le rendement du niébé au niveau d'un réseau de parcelles d'agriculteurs, 2) d'analyser la variabilité des quantités d' N fixés en fonction de la gestion de la fertilisation organique (fréquence d'apport de fumier de ferme au cours de la décennie précédente) et des variétés de niébé. L'étude est réalisée dans le cadre de cultures de niébé associées au mil, comme le pratiquent plus généralement les agriculteurs de la région d'étude.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Présentation du site expérimental

L'étude a été menée pendant la saison des pluies de l'année 2016 à Diohine, située dans la partie centre-ouest du Sénégal ($14^{\circ}30'4'' \text{ N}$; $16^{\circ}30'10'' \text{ W}$). Le climat est sahélo-soudanien avec une longue saison sèche de huit mois, de novembre à juin, et une courte saison des pluies de quatre mois, de juillet à octobre. En 2016, la pluviométrie s'élevant à 593 mm était proche des moyennes sur 20 ans. Les sols sont des arénosols. Ils sont sableux, avec un pH légèrement acide et une faible capacité d'échange cationique (CEC). Tounkara et al. (2020) ont montré que les différences de gestion organique entre les parcelles cultivées par l'association mil-niébé avaient des effets significatifs à la fois sur le pH des sols, leurs teneurs en carbone en azote et en éléments minéraux majeurs, et sur la densité apparente des sols.

2.2. Dispositif expérimental

En juin 2016, 3 champs de case et 3 champs de brousse ont été sélectionnés. Tous les champs de case sélectionnés ont reçu au cours de ces 10 dernières années au moins environ 10 t ha^{-1} chaque année de fumier de ferme épandu en surface du sol, juste avant le semis. Les champs de brousse, par contre, n'ont jamais reçu d'amendements organiques au cours de cette période. Le fumier de ferme est un mélange de divers résidus organiques disponibles au niveau des fermes, et principalement composé de déjections du bétail (bovins, ovins, équins) de résidus de mil et de légumineuses, ainsi que de cendres de feux de cuisine. Tous les champs sélectionnés étaient à moins de 500 m les uns des autres. Ils avaient le même type de sol (arenosols) et bénéficiaient d'un microclimat similaire. Ces 6 champs faisaient partie d'un réseau de 12 dont Mbengue et al. (2024) ont fourni une carte détaillée indiquant leurs localisations au sein du paysage étudié. Les différences de fertilité des sols n'étaient pas d'origine pédologique, mais essentiellement liées aux différences de gestion de la fertilisation organique au cours des dernières années. Les analyses de sols effectuées sur l'horizon de sol 0-10 cm en juin 2016 (avant semis) ont mis en évidence des niveaux de pH, de phosphore assimilable, de teneurs en N et C total, significativement plus élevés au niveau des champs de case que dans les champs de brousse de ce réseau, avec des valeurs de 6.72, 484 mg kg^{-1} , 0.27 % et 0.02 % respectivement en champs de case et 5.56, 3.74 mg kg^{-1} , 0.12 % et 0.01 % en champ de brousse (Mbengue et al., 2024).

Le dispositif expérimental a été traité comme un design en parcelles divisées (Split plot) : les parcelles principales étant la gestion de la fertilisation organique (3 champs de case, et 3 champs de brousse), et les sous-parcelles étant les variétés de niébé cultivées en association avec le mil (la variété locale : "Baye Ngagne", et la variété améliorée : "Mélakh"). Les semences de la variété locale, comme celles de la variété améliorée utilisées au niveau du réseau appartenaient à un même lot. Chaque sous-parcelle (deux par champ) avait une surface de 36 m^2 . La variété locale de niébé "Baye Ngagne" est une variété rampante à semi rampante, avec une floraison échelonnée entre les 40 et 70 jours après le semis, et à durée de cycle variant entre 80 et 110 jours d'après les agriculteurs. Les agriculteurs la décrivent comme



une variété dont les produits sont à double usage, à la fois pour la fane qui sert d'aliment pour le bétail présent au niveau de la ferme, et pour le grain qui contribue à l'alimentation de la famille et au revenu de la ferme. Cette variété locale est aussi décrite comme ayant une floraison précoce comparée aux autres variétés locales à cycle long présentes dans la région. Cette variété présenterait aussi une bonne résistance à la sécheresse et aux insectes et maladies les plus courants affectant le niébé dans la région. "Mélakh" est une variété semi-érigée sélectionnée à la station de recherche de Bambey et décrite dans le catalogue officiel des variétés homologuées (CEDEAO, 2017), comme ayant sa floraison à 45 jours, une durée de cycle de 52-61 jours après semis et un rendement potentiel de 1 t ha⁻¹.

Chaque sous parcelle s'inscrivait dans un champ cultivé par l'association mil/niébé local. Sur tous les champs, le mil a été semé selon la même géométrie que dans la pratique traditionnelle en culture pure, soit 12 000 poquets ha⁻¹, tandis que le niébé a été intercalé sur les lignes de mil, un poquet sur deux. La densité de niébé était donc de 6 000 poquets ha⁻¹, ce qui correspondait à 60 % de la densité de niébé qui serait retenue en culture pure dans la région (Figure 1). Les semis de mil ont été effectués avant le retour des pluies le 20 juin 2016 dans tous les traitements, et juste avant l'apport de fumier dans les champs de case. Une seule variété de mil était cultivée partout : le Souna III, une variété obtenue à la station de recherche de Bambey par recombinaison de 8 lignées, et caractérisée par son cycle court de 90 jours, sa faible sensibilité à la photopériode et son rendement potentiel de 3 t ha⁻¹. À l'exception de l'application de fumier effectuée à la dose moyenne de 10 t ha⁻¹ avant les semis, tous les champs de case et les champs de brousse ont été gérés de la même manière pendant l'étude. Aucun n'a été labouré avant le semis ni reçu d'engrais minéraux, d'irrigation ou de pesticides. La densité de semis du mil était typique de l'association pratiquée dans la région, mais la densité de semis du niébé a été multipliée par trois comparée à ce qui se fait plus généralement sur les parcelles d'agriculteurs de cette région. Une placette constituée de 8 lignes de mil sans niébé était présente à la limite de chaque champ du dispositif. Leurs valeurs d'abondance naturelle en ¹⁵N ont été utilisées comme référence pour le calcul des pourcentages d'azote fixés symbiotiquement par la légumineuse (% Ndfa).

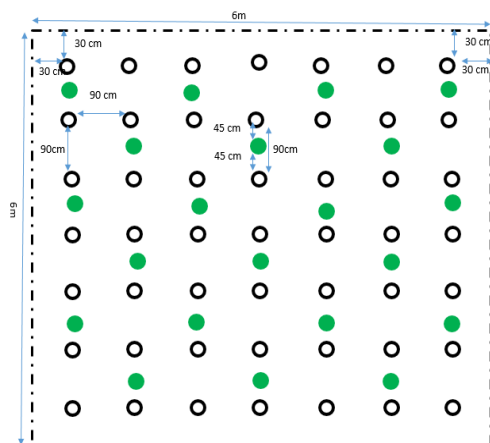


Figure 1 : Arrangement de l'association culturale mil+niébé. Pour le mil la même densité qu'en culture pure est conservée tandis que le niébé est semé à 60 % de la densité de culture pure pratiquée dans la région.

● Niébé ○ Mil



Association culturale mil/niébé dans les parcelles d'agriculteurs du village de Diohine, Sénégal (Photo crédit M. Mbengue)

2.3. Echantillonnage de plantes et variables collectées

Un total de 36 échantillons de biomasse aérienne de plants de niébé (18 dans les champs de case et 18 dans les champs de brousse) et 36 échantillons de biomasse aérienne de plants de mil cultivés en association avec le niébé (18 dans les champs de case et 18 dans les champs de brousse) ont été analysés. Trois plantes étaient sélectionnées dans chaque sous parcelle comme étant représentatives de



la croissance de la culture au niveau de la sous-parcelle. Un échantillon était composé de la biomasse aérienne d'une seule plante. Ces prélèvements ont été effectués dès que la culture de niébé avait atteint le stade où 50 % des pieds de la sous-parcelle ont fleuri. Les deux variétés ont atteint ce stade quasiment à la même date et ont donc été prélevées le même jour. Les échantillons ont été séchés à l'étuve à 65°C pendant 72 heures et broyés au laboratoire mixte international « Intensification écologique des sols » (LMI IESOL) de Dakar. Le rapport isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, l'abondance naturelle en ^{15}N (‰) et le %N de la matière végétale du niébé et de la plante de référence (le mil) ont été analysés au Laboratoire INRAE de Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes de Montpellier en France, en utilisant un autoanalyseur EA Eurovector et le spectromètre de masse Isoprime. Des capsules en étain ont reçu 3 mg de matière végétale chacune, puis ont été soigneusement pliées et conditionnées en vue de l'analyse. Les variables suivantes ont été calculées :

L'abondance en ^{15}N exprimée sous forme de notation delta ($\delta^{15}\text{N}$), en utilisant la formule ci-dessous :

$$\delta^{15}\text{N} \text{ ‰} = \frac{(1000 \times R_{\text{ech}} \% - R_{\text{standard}})}{R_{\text{standard}}}$$

où R_{ech} désigne la proportion de ^{15}N dans l'échantillon expérimental, et R_{standard} la proportion de ^{15}N de l'atmosphère (0.3663 ‰).

Le pourcentage d'azote atmosphérique fixé par la légumineuse (% Ndfa : N derived from atmosphere). Il a été calculé à l'exemple de Binacchi et al. (2022), Naab et al. (2008) et en utilisant la céréale (mil) comme plante de référence :

$$\text{Ndfa} \% = \frac{100 \times \delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{légumineuse}}}{\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}} - \beta}$$

où $\delta^{15}\text{N}_{\text{plante de référence}}$ et $\delta^{15}\text{N}_{\text{légumineuse}}$ sont respectivement l'abondance naturelle du mil non fixateur d'azote atmosphérique et du niébé fixateur d'azote atmosphérique, et β le $\delta^{15}\text{N}$ de la plante fixatrice fixant 100 % de l'azote de l'air. La valeur de -1.7 a été retenue pour β à l'exemple de Naab et al. (2008).

La quantité d'azote total accumulée par les cultures à floraison (kg ha^{-1})

L'azote total accumulé à floraison par le niébé d'une part et le mil d'autre part (N total), ont été calculés avec l'équation suivante :

$$\text{N total} = \left(\frac{\text{N cap} \times \text{Ba}}{\text{M cap}} \right) \times \text{P hect}$$

où N cap est le pourcentage d'azote de l'échantillon encapsulé, Ba, la biomasse aérienne d'un pied moyen à la floraison, M cap, la masse de l'échantillon encapsulé, P hect, le nombre de plantes par hectare. Nous avons considéré que P hect était égale aux densités de semis du niébé et du mil que nous avons retenues au départ pour les sous-parcelles (Figure 1).

La quantité d'azote fixée par le niébé au stade floraison (kg N ha^{-1})

Les quantités d'azote fixées par le niébé à floraison ont été calculées en rapportant les proportions de ^{15}N provenant de l'atmosphère (Ndfa en %) à l'azote total accumulé (en kg ha^{-1}).

$$\text{N fixé} = \text{Ndfa} (\%) \times \text{N total} (\text{kg N ha}^{-1})$$

Le nombre de nodules du niébé au stade floraison

Sur chaque sous-parcelle au stade floraison, les 3 plants de niébé prélevés pour les mesures de concentration en ^{15}N ont aussi été utilisés pour le comptage des nodules présents sur leurs racines. Les racines de niébé ont été prélevées sur un rayon de 50 cm et une profondeur de 50 cm à l'aide d'une pelle bêche.



Rendements en grains du niébé, et du mil en fin de cycle

La récolte des grains de niébé a eu lieu 57 jours après le semis pour la variété améliorée, et à deux reprises jusqu'à 75 jours après semis pour la variété locale. Celle des grains de mil a eu lieu 85 jours après la germination du mil. Les rendements en grains du niébé ont été déterminés sur un carré de rendement mesurant 10 m² de superficie au centre de chaque sous-parcelle. Dans chaque carré de rendement, nous avons 6 poquets de niébé et 12 de mil. Les récoltes de grains de niébé ont été séchées à l'étuve à 65 °C pendant 72 heures pour déterminer leurs rendements en matière sèche. Les rendements en grains du mil associé au niébé ont été mesurés en fin de cycle du mil après le même séchage à l'étuve que pour le niébé.

2.4. Analyses des données

Les effets de la gestion de la fertilisation organique (champ de case ou brousse) et des variétés de niébé (locale ou améliorée) sur la fixation d'azote et les rendements ont été analysés par ANOVA avec le logiciel Statistica, version 8, et la comparaison des moyennes a été effectuée par un test de Tukey au seuil de 5 %.

3. Résultats

3.1. Variation de la fixation d'azote par le niébé à floraison en fonction de la gestion organique et de la variété cultivée

Les valeurs de Ndfa du niébé étaient dans la gamme de 61 à 80 %, avec des valeurs significativement plus élevées en champs non amendé en fumier (champs de brousse) et pour la variété améliorée. Cependant exprimée à l'unité de surface, la quantité d'azote atmosphérique fixée par le niébé a été significativement plus élevée en champ amendé (champ de case) et pour la variété locale. Pour une même variété, les champs de case ont fixé 8 à 10 fois plus d'azote que les champs de brousse (Tableau 1). La variété locale de niébé (Baye Ngagne) a fixé 2 fois plus d'azote (exprimé en kg ha⁻¹) que la variété améliorée (Mélakh) en champ de case et 4 fois plus en champ de brousse (Tableau 1). Une interaction significative a été mise à jour entre la fertilisation organique et la variété de niébé vis-à-vis des quantités d'azote N fixées par le niébé, indiquant que la supériorité de la variété locale a augmenté quand le sol était pauvre. La nodulation du niébé a été sensiblement augmentée en champ de case, mais cette différence n'a pas été significative ($P > 0.05$). L'effet variété n'a pas été significatif sur le nombre de nodules.

La figure 2 illustre les contributions respectives de l'azote du sol et de l'azote atmosphérique à l'absorption d'N du niébé et du mil au niveau des traitements. Dans les champs de case, la variété locale de niébé a fixé 40.5 kg ha⁻¹ d'azote en provenance de l'atmosphère et a assimilé un total de 71.8 kg ha⁻¹. Elle a donc absorbé 31 kg ha⁻¹ d'azote minéral en provenance du sol. Les quantités d'N fixées et assimilées au total par le niébé amélioré en champ de case ont été significativement plus faibles. Dans les champs de brousse, les quantités d'azote fixées et assimilées par le niébé ont été très faibles comparés aux champs de case (Figure 2).



Table 1 : Variation des performances du niébé et du mil en fonction des options techniques expérimentées. Les valeurs entre parenthèses sont les écarts types des moyennes. Les champs de case sont régulièrement amendés en fumier et les champs de brousse rarement amendés au cours de la dernière décennie *: $P \leq 0.05$; **: $P \leq 0.01$; ***: $P \leq 0.001$; ns : $P > 0.05$

Variables mesurées	Niébé local / Champ de case	Niébé amélioré / Champ de Case	Niébé local/ Champ de Brousse	Niébé amélioré / Champ de Brousse	Signification des valeurs de P		
					Type de champ	Variété	Type de champ * Variété
$\delta^{15}\text{N}$ Niébé (‰)	4.5 (0.7)	3.6 (0.6)	3.1 (0.8)	1.4 (0.4)	**	*	ns
N % Niébé (%)	2.53 (0.12)	2.60 (0.20)	3.12 (0.30)	3.13 (0.21)	**	ns	ns
Biomasse Niébé à floraison (kg ha ⁻¹)	3158 (858)	1053 (286)	195 (23)	65 (8)	***	*	*
N total Niébé à floraison (kg ha ⁻¹)	71.8 (16)	27.4 (8.2)	5.9 (0.7)	2 (0.3)	***	*	*
Ndfa Niébé à floraison (%)	61.1 (4.4)	66.2 (3.9)	69.8 (4.8)	80.1 (2.3)	**	*	ns
N Niébé issu de la fixation symbiotique (kg ha ⁻¹)	40.5 (7.7)	16.3 (4.2)	4.2 (0.7)	1.6 (0.2)	***	**	*
N % Mil à floraison (%)	0.50 (0.04)	0.80 (0.03)	0.53 (0.04)	0.88 (0.10)	ns	***	ns
Biomasse Mil à floraison (kg ha ⁻¹)	6975 (888)	7091 (710)	3321 (627)	3506 (768)	***	ns	ns
N total Mil à floraison (kg ha ⁻¹)	38.3 (8.3)	56.3 (5.8)	18.6 (4)	25.8 (3.2)	***	*	ns
Nombre nodules/Plante de niébé à floraison	15 (4)	16 (2)	11 (2)	12 (2)	ns	ns	ns
Rendement grains Niébé en fin de cycle (kg ha ⁻¹)	651 (51)	279 (16)	142 (19)	51 (2)	***	***	***
Rendement grains Mil en fin de cycle (kg ha ⁻¹)	793 (91)	927 (68)	678 (117)	530 (111)	*	ns	ns

3.2. Variation du rendement en grains du niébé (kg ha⁻¹) en fonction de gestion organique et de la variété cultivée

Les rendements en grains mesurés à la récolte ont été significativement plus élevés en champ de case et pour la variété locale. L'effet variété sur cette variable n'a été significatif qu'en champ de case (Tableau 1). Les rendements en fanes du niébé à la récolte n'ont pas été mesurés, mais les rendements en fanes mesurés à la floraison, soit environ 10 jours plus tôt pour la variété améliorée présentaient les mêmes tendances que le rendement en grains à la récolte en fonction des traitements.

3.3. Variation de la nutrition azotée et du rendement du mil associé au niébé en fonction de la gestion organique et de la variété cultivée

Le mil associé au niébé en champ de case a assimilé significativement plus d'azote qu'en champ de brousse. Il a assimilé plus d'azote quand il était associé à la variété améliorée que quand il était associé à la variété locale (Figure 2). On a retrouvé la même tendance aussi bien en champs de case qu'en champ de brousse. Les rendements en grains du mil à la récolte ont été significativement plus élevés en champ de case qu'en champ de brousse. Ils ont été globalement plus élevés dans l'association avec la variété améliorée qu'avec la variété locale, mais les différences n'ont pas été statistiquement significatives ($P > 0.05$).

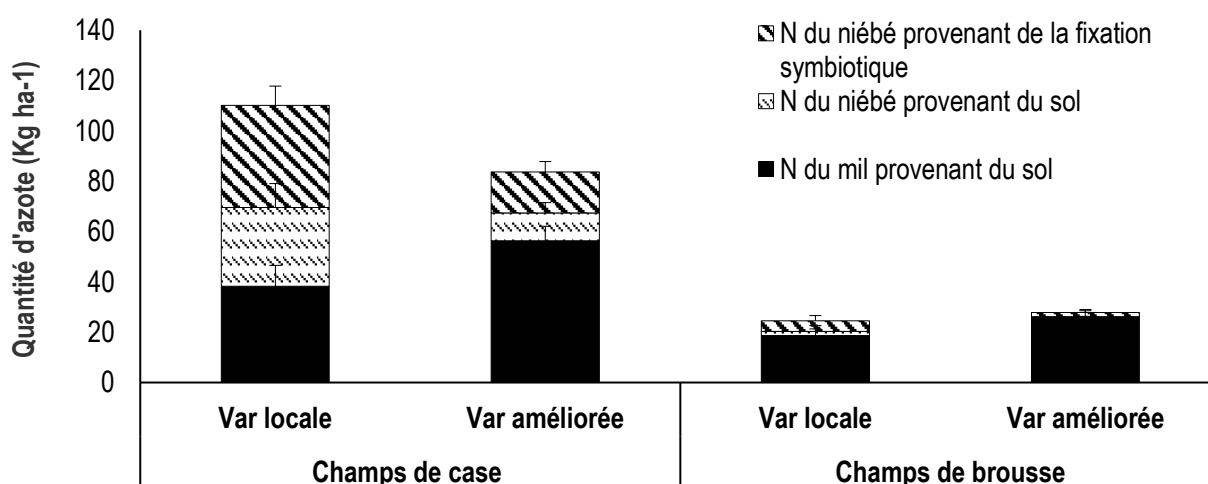


Figure 2 : Quantités d'azote (N) provenant soit du sol (pour le niébé et le mil), soit de la fixation symbiotique (pour le niébé), les deux espèces étant cultivées en association. Var Locale indique la variété locale rampante de niébé (« Baye Ngagne ») et var améliorée indique la variété améliorée à cycle court de niébé (Mélakh). Les champs de case sont régulièrement amendés en fumier et les champs de brousse rarement amendés au cours de la dernière décennie.

4. Discussion

Les résultats de nos observations sur le terrain montrent une nodulation du niébé nettement moins importante que celle obtenue en conditions contrôlées par Fall et al. (2003) pour la même variété améliorée (Mélakh). Ceci suggère que les conditions de culture des parcelles d'agriculteurs ont pu être moins favorables à la nodulation que les essais variétés établis en serre. Les valeurs de % Ndfa attestent que le niébé a couvert grâce à la fixation symbiotique, et dans toutes les situations étudiées, une part significative de ses besoins azotés. Les augmentations significatives des valeurs de % Ndfa du niébé en champ de brousse (non amendé en fumier) et avec la variété améliorée (Mélakh) pourraient être justifiées par une compétition pour l'azote du sol plus grande exercée par le mil associé dans ces situations (Sánchez-Navarro et al., 2024).

L'augmentation de la fixation d'azote du niébé (exprimée en kg ha^{-1}) en champ de case, n'est pas associée à des valeurs plus élevées de % Ndfa en champ de case qu'en champ de brousse. Nos résultats indiquent qu'elle est principalement imputable à une production de biomasse de niébé plus importante en champ de case. L'augmentation de la production de biomasse de niébé avec l'apport de fumier qui caractérise les champs de case est cohérente avec les références qui montrent que la fertilisation organique un rôle fondamental dans la productivité des agrosystèmes étudiés : elle est la principale source d'éléments nutritifs essentiels aux cultures (Toukara et al., 2020), elle améliore la structure du sol et sa capacité de rétention en eau (Toukara et al., 2020 ; Liu et al., 2024), et elle favorise via le développement de la vie du sol et sa diversité, le contrôle naturel des bioagresseurs des cultures (Mbengue et al., 2024).

Comparée à la variété améliorée, la variété locale a significativement augmenté la fixation d'azote du niébé (exprimée en kg ha^{-1}). Comme dans le cas des champs de case, ce résultat est principalement imputable à une production de biomasse de niébé plus élevée de la variété locale. Une cause majeure de la plus forte production de biomasse de la variété locale pourrait être qu'elle est mieux adaptée aux nombreuses contraintes biophysiques de ces agrosystèmes. Par exemple, son port rampant, sa floraison échelonnée et ses caractéristiques racinaires (distribution spatiale, densité de longueur de racines, exsudats) pourraient avoir permis une plus grande efficacité de l'eau, des nutriments et de la lumière dans le cadre de l'association avec le mil. Cette hypothèse est en phase avec les agriculteurs qui



décrivent cette variété comme « élastique », en référence à sa tolérance au stress hydrique. Elle est aussi en phase avec Casañas et al. (2017) qui soulignent que les variétés locales parce qu'elles sont génétiquement hétérogènes, et parce qu'elles ont pu évoluer à partir de la sélection naturelle et artificielle des utilisateurs, seraient bien adaptées pour répondre aux contraintes édaphiques et climatiques de leur région, et/ou aux motivations personnelles des agriculteurs qui les utilisent. Ces résultats de performances de la variété locale « Baye gagne » mériteraient d'être approfondis dans les travaux futurs et pourrait intéresser les programmes d'amélioration variétale menés par les sélectionneurs.

Le choix de la variété de niébé a un impact significatif sur la compétition avec le mil cultivé en association. La variété locale plus productive en termes de biomasse exerce une pression compétitive plus forte sur le mil que la variété améliorée. Ces résultats suggèrent que les fortes densités de semis du niébé (environ) trois fois supérieure à celle des pratiques agricoles locales) ont joué un rôle crucial dans la dynamique de compétition du niébé local avec le mil. Pour optimiser la production des deux cultures tout en favorisant la production de biomasse et la fixation d'azote du niébé, il est probable que la densité de semis du niébé local doit être ajustée à la baisse. Cette hypothèse est en accord avec les pratiques locales où les agriculteurs réduisent la densité de semis du niébé local en association en vue de limiter la compétition et favoriser le mil.

La variabilité des relations de compétition entre le mil et le niébé en fonction des variétés de niébé suggère que les variétés de niébé qui seraient les plus performantes en culture pure, ne le seraient pas toujours en culture associée avec le mil. Les essais traditionnels comparent souvent les variétés en culture pure et ne tiennent donc pas compte des relations entre espèces au niveau des cultures associées, ni des motivations de l'agriculteur qui fait son choix de variétés de niébé et de densité de semis. Ici, on peut penser que c'est avant tout le double usage des produits du niébé, à la fois pour la fane et le grain qui a orienté les agriculteurs vers le choix de la variété locale, et c'est la priorité accordée au mil qui les ont probablement orientés vers des densités de niébé plus faibles que celles expérimentées dans cette étude. Un conseil de variété basé sur le seul critère de la quantité d'azote fixée par la légumineuse, aurait été inadapté dans ces conditions. Cette étude révèle les limites d'une approche réductionniste pour l'évaluation des variétés, en particulier dans un contexte où les interactions entre cultures et les contraintes environnementales et socio-économiques sont multiples.

5. Conclusion

La fertilisation organique et les variétés sont deux leviers actionnables en vue d'améliorer la fixation d'azote par le niébé cultivé en association avec le mil. En champ de case, la variété locale a permis grâce à une production de biomasse plus élevée, de fixer environ trois fois plus d'azote que la variété améliorée, mais cette production élevée de biomasse est associée à une compétition importante exercée par le niébé local sur la culture de mil associé. C'est probablement dans la perspective de réduire cette compétition que les agriculteurs pratiquent en général des densités de semis de niébé trois fois plus faibles que dans notre étude. La variété locale 'Baye Ngagne' apparaît comme une ressource génétique particulièrement adaptée à ce contexte de production. Les résultats de cette étude mettent en évidence la nécessité de co-construire avec les agriculteurs des protocoles d'évaluation des variétés de niébé, afin de prendre en compte une plus grande diversité de critères et de mieux répondre à leurs besoins.



Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Médoune Mbengue : 0009-0004-0189-2466

Laurent Cournac : 0000-0003-0371-938X

Cathy Clermont-Dauphin : 0000-0001-6500-9194

Contributions des auteurs

Conceptualisation : M.M., C.C.D. et L.C. Méthodologie : M.M., C.C.D. et L.C. Investigation : M.M. analyse des données : M.M. et C.C.D. Rédaction—ébauche originale : M.M. et C.C.D. Révision : M.M., C.C.D., L.C., I.D. et S.F. Acquisition Financement : C.C.D et L.C.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts concernant la publication de cet article.

Remerciements

Les auteurs remercient l'UMR Eco&Sols (IRD-Montpellier), le LMI IESOL (IRD-ISRA Dakar) et l'Université de Thiès au Sénégal pour leur soutien institutionnel. Nous remercions également le laboratoire B&PMP de Montpellier pour avoir réalisé les analyses du ^{15}N par spectrométrie de masse. Nous exprimons notre gratitude à Anne-Sophie Voisin pour les conseils apportés pour l'analyse de ces résultats et aux agriculteurs du site d'étude (village de Diohine) pour avoir partagé leurs champs et leurs connaissances durant cette recherche.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été soutenu par :

- le programme ARTS de l'IRD sous la subvention n° 913767 K, ISRA,
- le programme CGIAR CRP GLDC
- le programme WAAPP intensification,
- ANR-13-AGRO-002, CERA0



Références bibliographiques

- 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* 231, 45–54 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010386800937>
- Bado B.V., Bationo A., Lompo F., Cescas M.P., Sedogo M.P., 2007. Mineral fertilizers, organic amendments and crop rotation managements for soil fertility maintenance in the Guinean zone of Burkina Faso (West Africa). In A. Bationo, B. Waswa, J. Kihara, & J. Kimetu (Éds.), *Advances in Integrated Soil Fertility Management in sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities* (p. 171-177). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5760-1_15
- Bado B. V., Sedogo M., Lompo F., Laminou S. M.M., 2018. Biological Nitrogen Fixation by Local and Improved Genotypes of Cowpea in Burkina Faso (West Africa): Total Nitrogen Accumulated can be used for Quick Estimation. *Advances in Agriculture*, 2018, e9641923. <https://doi.org/10.1155/2018/9641923>
- Binacchi F., Rusinamhodzi L., Cadisch G., 2022. The potential of conservation agriculture to improve nitrogen fixation in cowpea under the semi-arid conditions of Kenya. *Front. Agron.* 4:988090. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.988090>
- Bonilla I., Bolaños L., 2009. Mineral Nutrition for Legume-Rhizobia Symbiosis: B, Ca, N, P, S, K, Fe, Mo, Co, and Ni: A Review. In: Lichtfouse, E. (eds), *Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants. Sustainable Agriculture Reviews*, vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9654-9_13
- Casañas F., Simó J., Casals J., Prohens J., 2017. Toward an Evolved Concept of Landrace. *Frontiers in Plant Science*, 8 : 145. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00145>
- CEDEAO, 2017. Catalogue Régional des Espèces et Variétés Végétales. Available via [http:// www. insah. org/ doc/ pdf/ Catalogue_Regional_semences_vf_janv_2017. pdf](http://www.insah.org/doc/pdf/Catalogue_Regional_semences_vf_janv_2017.pdf). 1–114. (French).
- Costa M. G., Ferreira E. V. de O., Souza A. A., Leite A. L. A., Silva A. G. X., Cunha A. S., Duque F.J.S., Lima M. J. A., 2023. Interaction of liming, mineral nitrogen fertilization, and Rhizobium inoculation in biomass partitioning and production of cowpea. *Journal of Plant Nutrition*, 46(16), 3794–3809. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2211618>
- Fall L., Diouf D., Fall M. A., Badiane F. A., Gueye M., 2003. Genetic diversity in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] varieties determined by ARA and RAPD techniques. *African Journal of Biotechnology*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.5897/AJB2003.000-1009>
- FAOSTAT, 2023. Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Franke AC, Van den Brand GJ, Vanlauwe B & Giller KE (2018) Sustainable intensification through 415 rotations with grain legumes in Sub-Saharan Africa: A review. *Agric Ecosyst Environ.* 261. 172–416 185. doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.029
- Halilou O., Hamidou F., Taya B.K., Mahamane S., Vadez V., 2015. Water use, transpiration efficiency and yield in cowpea (*Vigna unguiculata*) and peanut (*Arachis hypogaea*) across water regimes. *Crop and Pasture Science* 66, 715-728. <https://doi.org/10.1071/CP14182>
- Hamidou F., Harou A., Achirou B. F., Halilou O., Bakasso Y., 2018. Nitrogen Fixation by Groundnut and Cowpea for Productivity Improvement in Drought Conditions in the Sahel. *Tropicultura (TSI)*, 36(1), Article 1.
- Herridge D. F., Peoples M. B., Boddey R. M., 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>



- Kocira A., Staniak M., Tomaszewska M., Kornas R., Cymerman J., Panasiewicz K., Lipińska, H., 2020. Legume Cover Crops as One of the Elements of Strategic Weed Management and Soil Quality Improvement. A Review. *Agriculture*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090394>
- Liu Y., Lan X., Hou H., Ji J., Liu X., Lv Z., 2024. Multifaceted Ability of Organic Fertilizers to Improve Crop Productivity and Abiotic Stress Tolerance: Review and Perspectives. *Agronomy*, 14(6), 1141. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061141>
- Mbengue M., Tall L., Diakhate S., Founoune H., Diedhiou P. M., Diedhiou I., Trap J., Cournac L., Clermont-Dauphin C., 2024. Intercropping Millet with Cowpea Reduces *Pratylenchus* Abundance and Improves Land Use Efficiency in a Low Input Sub-Saharan Cropping System. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(1), 1448-1459. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01648-6>
- Munjonji L., Ayisi K.K., Haesaert G., Boeckx P., 2018. Screening Cowpea Genotypes for High Biological Nitrogen Fixation and Grain Yield under Drought Conditions. *Agronomy Journal*, 110: 1925-1935. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0037>
- Naab J.B., Chimphango S.M.B., Dakora F.D., 2009. N₂ fixation in cowpea plants grown in farmers' fields in the Upper West Region of Ghana, measured using ¹⁵N natural abundance. *Symbiosis* 48, 37–46. <https://doi.org/10.1007/BF03179983>
- Namatsheve T., Cardinael R., Corbeels M., Chikowo R., 2020. Productivity and biological N₂-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(4), 30. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00629-0>
- Rathjen J.R., Ryder M.H., Riley I.T., Lai T.V., Denton M.D., 2020. Impact of seed-applied pesticides on rhizobial survival and legume nodulation, *Journal of Applied Microbiology*, 129, Issue 2, 1, Pages 389–399, <https://doi.org/10.1111/jam.14602>.
- Sánchez-Navarro V., Marcos-Pérez M., Contreras J., Zornoza, R., (2024). Biological nitrogen fixation and intra- and interspecific competition in two vegetable/legume intercropping systems and their relationship to crop yield. *Scientia Horticulturae*, 337, 113502, ISSN 0304-4238, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113502>
- Tang H., Hassan M. U., Feng L., Nawaz M., Shah A. N., Qari S. H., Liu Y., Miao J., 2022. The Critical Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Improve Drought Tolerance and Nitrogen Use Efficiency in Crops. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>
- Toukara A., Clermont-Dauphin C., Affholder F., Ndiaye S., Masse D., Cournac L., 2020. Inorganic fertilizer use efficiency of millet crop increased with organic fertilizer application in rainfed agriculture on smallholdings in central Senegal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294, 106878. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106878>
- Zougmore R., Kambou F. N., Ouattara K., Guillobez S., 2000. Sorghum-cowpea Intercropping: An Effective Technique Against Runoff and Soil Erosion in the Sahel (Saria, Burkina Faso). *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14(4), 329–342. <https://doi.org/10.1080/08903060050136441>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.