

Évaluation des effets du travail du sol et de l'association maïs-niébé sur l'humidité du sol et l'assimilation chlorophyllienne du maïs

[Assessment of the effects of tillage and the maize-cowpea combination on soil moisture and chlorophyll assimilation in maize]

RAMDE Guialidou¹, PALE Siébou², KOUMBEM Mahamoudou², HIEN Edmond¹, TRAORE Hamidou², PRASAD P.V. Vara^{3,4}, and MIDDENDORF B. Jan³

¹Laboratoire Sols, Matériaux et Environnement, Université Joseph Ki-Zerbo, 03 B.P. 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

²Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, 04 B.P. 8645 Ouagadougou 04, Burkina Faso

³Feed the Future Innovation Lab for Collaborative Research on Sustainable Intensification, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA

⁴Department of Agronomy, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The fragility of agrosystems affects soil moisture and plant chlorophyll content, reducing productivity. The development of agricultural technologies that improve soil water status and plant physiology is therefore necessary. This study aimed to evaluate the effect of these practices on soil moisture and leaf chlorophyll in maize through a randomised complete block split-plot trial with three replicates. Three tillage methods (scarification, ploughing and partitioned ridge cultivation) were applied to the main plots. Two cropping systems (CS1: one row of maize alternating with one row of cowpea and CS2: two rows of maize alternating with two rows of cowpea) combined with five fertilisation levels (i) no fertilisation (F1), (ii) 200 kg ha⁻¹ NPK + 200 kg ha⁻¹ urea on maize + 100 kg ha⁻¹ NPK on cowpea (F2), (iii) 300 kg ha⁻¹ NPK + 100 kg ha⁻¹ urea on maize + 100 kg ha⁻¹ NPK on cowpea (F3), (iv) F2 +2500 kg ha⁻¹ of compost (F4) and (v) F3 +2500 kg ha⁻¹ of compost (F5) were applied to the secondary plots. The chlorophyll index of maize and soil moisture were assessed. Scarification resulted in significantly lower moisture content (14.28%) than ridge cultivation (17.98%) and ploughing (16.91%). SC1-F5 recorded a higher SPAD index (38.62). The combination of tillage, cropping system and organic-mineral fertilisation improves soil moisture and chlorophyll assimilation in maize.

KEYWORDS: compartmentalised ridging, fertilisation, ploughing, cowpea, cropping system.

RESUME: La fragilité des agrosystèmes affecte l'humidité du sol et la teneur en chlorophylle des plantes, réduisant la productivité. Le développement de technologies agricoles améliorant l'état hydrique des sols et physiologique des plantes est donc nécessaire. Cette étude visait à évaluer l'effet de ces pratiques sur l'humidité du sol et la chlorophylle foliaire du maïs à travers un essai en blocs complètement randomisés avec des traitements arrangés en split-plot et trois répétitions. Trois méthodes de travail du sol (scarifiage, labour et billonnage cloisonné) ont été appliquées aux parcelles principales et deux systèmes de culture qui sont (i) une ligne de maïs alternée d'une ligne de niébé et (ii) deux lignes de maïs alternées de deux lignes de niébé (SC2) combinés à cinq niveaux de fertilisation (i) sans fertilisation (F1), (ii) 200 kg ha⁻¹ NPK+200 kg ha⁻¹ urée sur le maïs+ 100 kg ha⁻¹ NPK sur le niébé (F2), (iii) 300 kg ha⁻¹ NPK+100 kg ha⁻¹ urée sur le maïs + 100 kg ha⁻¹ NPK sur le niébé (F3), (iv) F2 +2500 kg ha⁻¹ de compost (F4) et (v) F3 +2500 kg ha⁻¹ de compost (F5) ont été appliqués aux parcelles secondaires. L'indice chlorophyllien du maïs et l'humidité du sol ont été évalués. Le scarifiage a présenté une humidité (14,28%) significativement plus faible que le billonnage cloisonné (17,98%) et le labour (16,91%). Le SC1-F5 a enregistré un indice SPAD plus élevé (38,62). L'association du travail du sol, du système de culture et de la fertilisation organo-minérale améliore l'humidité du sol et l'assimilation chlorophyllienne du maïs.

MOTS-CLEFS: billonnage cloisonné, fertilisation, labour, Niébé, système de culture.

1 INTRODUCTION

Au Burkina Faso, le maïs (*Zea mays* L.) est l'une des céréales les plus importantes. En effet, selon [1], la production du maïs a été de 1 995 359,46 tonnes en 2023 surpassant le sorgho (1 772 021,68 tonnes). Durant la campagne agricole 2023 - 2024, la production a connu une hausse de 9,2% (estimée à 2 053 927 tonnes par rapport à la moyenne des cinq dernières années) [2]. C'est une denrée d'une importance majeure de par ses usages culinaires et ses valeurs nutritionnelles. Le maïs est généralement produit en culture pure ou en association avec le niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp].

A l'image des autres régions Africaines, le Burkina Faso fait face au phénomène de dégradation des terres et en est une zone de dégradation par excellence. En effet, en plus de la pauvreté naturelle des sols dans sa quasi-totalité, les sols sont d'avantage exposés à l'altération. Le déficit des sols en matière organique et en phosphore a souvent été montré à l'évidence [3], [5]. L'action conjuguée de ces facteurs impactent négativement la production agricole des populations rurales dont la principale source de revenu et les moyens de subsistances demeurent les exploitations des terres agricoles. Il est par ailleurs de connaissance évidente que le Burkina Faso est un pays à vocation agricole où l'agriculture est le pilier de l'économie. En outre, l'agriculture burkinabè occupe environ 80% de la population active [6]. En 2024, la part contributive du secteur primaire au Produit intérieur brut (PIB) était de 20% contre 17,1% en 2023 [7]. Aussi, selon [8], 56,2% des travailleurs sont du secteur primaire. L'agriculture est donc un important secteur du développement du pays. Malgré cet état de fait, l'autosuffisance alimentaire reste un objectif à atteindre [9]. Par ailleurs, l'agriculture burkinabè est extensive et caractérisée par de petites exploitations familiales et assujettie à la pluviométrie. L'agriculture pluviale pratiquée dans le contexte sahélien et particulièrement au Burkina Faso souffre de sa vulnérabilité aux aléas climatiques tels que l'irrégularité de la pluie, les inondations, les poches de sécheresse. A cela s'ajoute la raréfaction des terres cultivables provoquée par une pression démographique. L'atteinte de la sécurité alimentaire demeure donc un défi difficile à relever dans ces conditions de précarité [10], [11]. Dans la perspective de mieux gérer la fertilité des sols et partant d'optimiser la productivité agricole, des techniques de Conservation des Eaux et des Sols et de Défense et Restauration des Sols (CES-DRS), des méthodes de travail du sol et de la fertilisation minérale et organique ont été développées. A titre d'illustration, une étude menée à l'ouest du Burkina Faso sur le maïs, montre que le labour a donné un rendement grain de 1110 Kg ha⁻¹ et de 1340 kg ha⁻¹ pour la paille [13]. L'amendement organique et minéral a donné de meilleurs rendements grains entre 2041 kg ha⁻¹ et 1635 kg ha⁻¹ suivant les traitements.

D'autre part, dans le cadre de la recherche des doses optimales de fertilisation, la technique de la microdose qui une application localisée d'engrais en très petite quantité [14] est utilisée. Une étude sur la fertilisation du maïs et du soja, a montré que la technique de la microdose a induit une augmentation des rendements du maïs d'environ 50% [15]. D'autres auteurs comme [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22] ont montré que l'apport de la matière organique (MO) améliore les propriétés physiques, chimiques et l'activité biologique des sols. Elle offre un bon état hydrique du sol, une meilleure physiologie des plantes et de meilleurs rendements agricoles.

De même, des méthodes résilientes, agroécologiques et protectrices des sols telles que les associations de cultures ont prouvé leur efficacité. Les performances agronomiques de l'association céréale-niébé et le rôle majeur du niébé dans la fixation de l'azote atmosphérique indispensable à l'assimilation chlorophyllienne ont été démontré dans des travaux de recherche antérieurs [23], [24]. En effet, des études ont montré que l'entrecroisement maïs-niébé a augmenté la teneur relative en chlorophylle du maïs [25] et rehaussant ainsi l'indice chlorophyllien des feuilles de maïs de 12,9% [26]. Malgré, les recherches pour une meilleure compréhension des systèmes maïs-niébé, il existe des limites surtout liées à la faible intégration des effets combinés de la fertilisation minérale et organique et aussi les interactions complexes comme les effets du travail du sol, des systèmes de cultures et de la fertilisation sur l'humidité et la chlorophylle. Par ailleurs, il faut noter que la gestion de l'humidité du sol et de l'état physiologique des cultures reste dépendante de la fertilité des sols et des aléas climatiques. Il est donc impératif de développer des technologies intégrant le travail du sol, les systèmes de culture et la fertilisation organo-minérale à même d'assurer un état hydrique des sols et physiologique des plantes pour une durabilité de la productivité agricole. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer les effets du travail du sol, du système de culture et de la fertilisation organo-minérale sur l'humidité du sol et l'indice chlorophyllien des plants de maïs en association avec le niébé et de proposer une combinaison qui améliorera le potentiel hydrique du sol et l'assimilation chlorophyllienne du maïs.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITE DE L'ÉTUDE

Cette étude a été réalisée sous conditions pluviales en 2024 et 2025 à la Direction Régionale de Recherches Environnementales et Agricoles du Centre, station de Saria (12° 16' latitude nord ; 2° 9' longitude Ouest). Cette station de recherche est une des stations de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA). Elle est située à 80 Km à l'Ouest de Ouagadougou dans la province de Boulikie mdé (Figure 1) et à 23 Km à l'Est de Koudougou. Le site se situe dans la zone climatique soudano-sahélienne avec une saison de pluie qui va de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. Sur le site d'étude, une variation intersaison des pluviométries annuelles des dix dernières années (2016 à 2025) a été observée avec une moyenne de 870,29 mm. La hauteur des pluies enregistrées durant l'année 2024 a été de 910,6 mm avec 69 jours de pluie contre 821,5 mm avec 71 jours pour l'année 2025. En 2024, les

températures mensuelles minima ont varié de 12,63 °C à 27,53 °C avec une moyenne annuelle de 20,85 °C et les maxima de 31,01 °C à 41,24 °C avec une moyenne de 35,61 °C. En 2025, les minima se situent entre 14,34 °C et 26,03 °C avec une moyenne annuelle de 21,21 °C tandis que les maxima ont varié de 30,37 °C à 40,70 °C. Le substrat sur lequel a été conduit l'essai est un sol ferrugineux tropical lessivé induré (CPCS, 1967). Le sol a une carapace située à plus de 50 cm de profondeur avec une texture sablo-limoneuse en surface (78,92% de sable, 13,11% de limon et 7,96% d'argile), une faible capacité de rétention en eau et un pH (eau) de 5,18. La matière organique totale est de 0,49% avec un rapport de C/N de 10; la somme des bases échangeables est de 2,14 méq/100g, une CEC de 3,8525 méq/100g et un taux de saturation (S/T) de 55,5%.

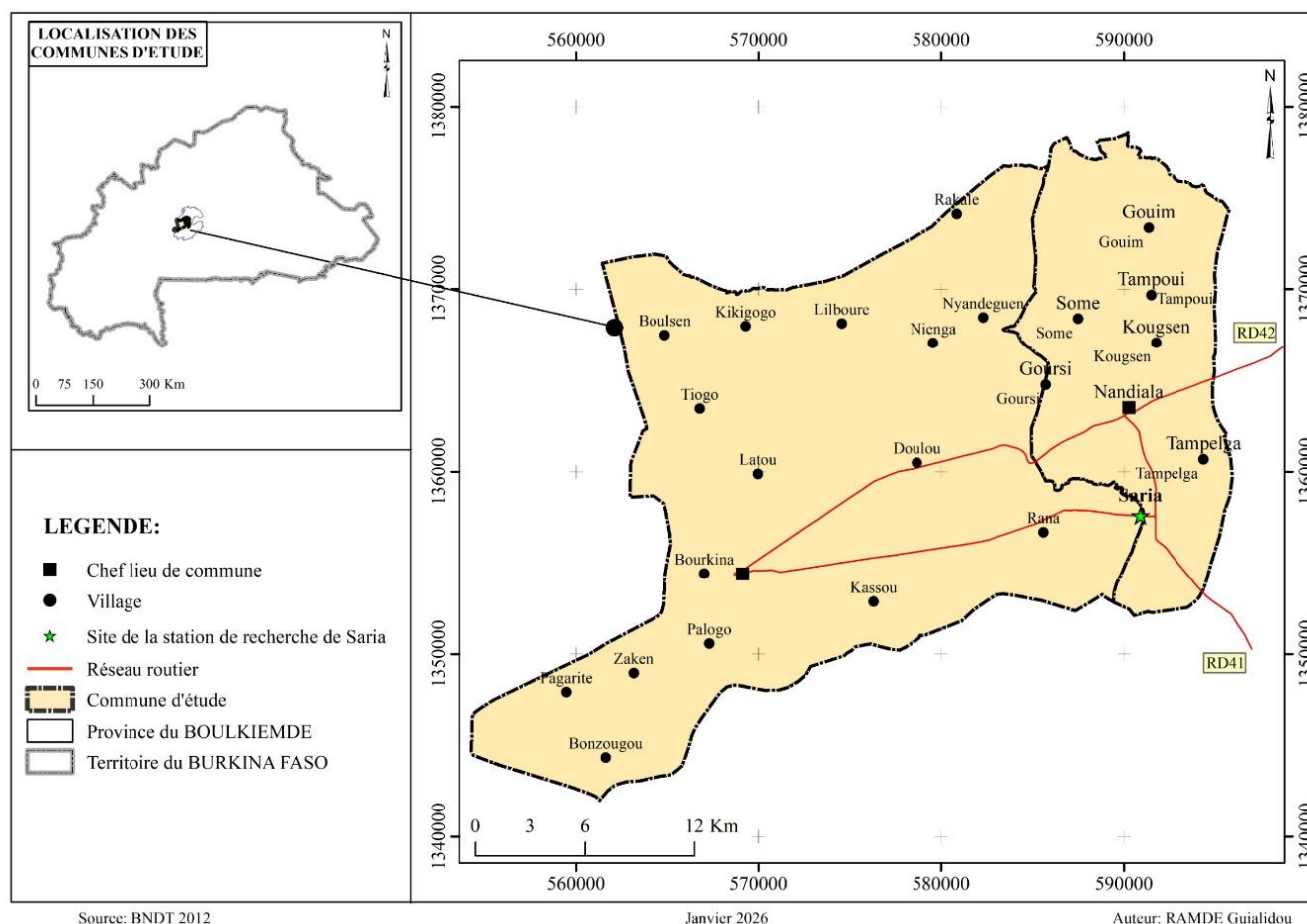


Fig. 1. Carte de localisation du site d'étude (Station de Recherches de Saria) dans la région du centre-ouest du Burkina Faso

2.2 MATERIEL VEGETAL

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est composé d'une variété FBC6 de maïs et d'une variété Teek-songo de niébé, toutes mises au point par l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA). La variété FBC6 est une variété composite à double objectif (grain et fourrage) avec un cycle végétatif de 91 jours et pouvant atteindre 2,15 m de hauteur. Elle a un rendement potentiel de 5,6 t ha⁻¹. La variété Teek-songo du niébé est aussi une variété à double usage avec une bonne couverture du sol. Elle a un rendement potentiel en grain de 1,5 t ha⁻¹ et en fane de 4,5 t ha⁻¹ avec un cycle végétatif de 70 jours. La culture de ces deux variétés est recommandée dans la zone soudano-sahélienne. En effet, ces deux variétés sont adaptées au climat difficile et sont bien appréciées par la population locale. La variété Teek-songo peut donner des rendements satisfaisants sur des sols à fertilité médiocre et a une bonne valeur économique.

2.3 FERTILISANTS

Le compost ayant servi de fertilisant organique a été obtenu auprès de la société Bioprotect spécialisée dans la production de biofertilisants et de biopesticides. Les caractéristiques du compost sont consignées dans le tableau 1. Les engrais minéraux utilisés dans le cadre de cet essai ont été le NPK 14 N-23 P₂O₅-14 K₂O-6 SO₃-2 B et l'urée 30 N-3 MgO-8 S-0,3 Zn-0,2 B.

Tableau 1. Caractéristiques chimiques du compost

Carbone et matière organique				Phosphore		Potassium		Éléments totaux		pH (eau)
MO total	C Total	N Total	C/N	P Assimilable	P Total	K disponible	K total	Ca Total	Mg Total	
(%)				(mg/Kg)		(g/Kg)		(mg/Kg)		
28,26	16,39	0,91	18	311,18	5,99	14,1	14,39	654,30	178,96	7,82

Note: C = Carbone, N = Azote, P = Phosphore, K = potassium, Ca = Calcium, Mg = Magnésium

2.4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental utilisé est un bloc complètement randomisé avec des traitements arrangés en split-plot avec trois répétitions. Les parcelles principales sont représentées par trois méthodes de travail du sol (TS). Les parcelles secondaires sont représentées par deux systèmes de culture (SC) combinés à cinq (05) niveaux de fertilisation du sol (fertilisation minérale et/ou organique) (F). La taille de la parcelle élémentaire est 24 m² soit six mètres de long sur quatre mètres de large. Ces parcelles sont séparées par des allées d'un (01) m. Les différents traitements appliqués sont consignés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Méthodes de travail du sol (TS), systèmes de culture (SC) et les niveaux de fertilisation (F)

Travail du sol									
TS1: Scarifiage (grattage superficiel) au cultivateur (houe manga) par traction bovine à une profondeur moyenne de 10 cm.									
TS2: Labour superficiel à la charrue (CH9) par traction bovine à une profondeur moyenne de 15 cm.									
TS3: Billonnage cloisonné, réalisé à l'aide de la charrue à corps butteur par traction bovine suivant la ligne de semis suivie d'un cloisonnement à un mois après semis du maïs et du niébé.									
Systèmes de culture									
SC1: Association de maïs et de niébé en lignes alternées: 1 ligne de maïs suivie de 1 ligne de niébé.									
SC2: Association de maïs et de niébé en lignes alternées: 2 lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé									
Fertilisation	N	Mg	P ₂ O ₅	Zn	K ₂ O	S	B	Compost	
	Kg ha ⁻¹								
F1 = Zéro fertilisation	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2 = 200 kg ha ⁻¹ de NPK + 200 kg ha ⁻¹ d'urée 30 N sur le maïs et 100 kg ha ⁻¹ de NPK sur le niébé	102	6	46	0,6	42	34	6,4	0	0
F3 = 300 kg ha ⁻¹ de NPK + 100 kg ha ⁻¹ d'urée 30 N sur le maïs et 100 kg ha ⁻¹ de NPK sur le niébé	86	3	69	0,3	56	32	8,2	0	0
F4 = F2 + 2500 kg ha ⁻¹ de Compost	102	6	46	0,6	42	34	6,4	2500	0
F5 = F3 + 2500 kg ha ⁻¹ de Compost	86	3	69	0,3	56	32	8,2	2500	0

Tableau 3. Combinaisons des systèmes de culture et des niveaux de fertilisation (SC-F)

SC1-F1 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 1 ligne de maïs suivie de 1 ligne de niébé avec F1
SC1-F2 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 1 ligne de maïs suivie de 1 ligne de niébé avec F2
SC1-F3 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 1 ligne de maïs suivie de 1 ligne de niébé avec F3
SC1-F4 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 1 ligne de maïs suivie de 1 ligne de niébé avec F4
SC1-F5 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 1 ligne de maïs suivie de 1 ligne de niébé avec F5
SC2-F1 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 2 lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé avec F1
SC2-F2 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 2 lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé avec F2
SC2-F3 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 2 lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé avec F3
SC2-F4 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 2 lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé avec F4
SC2-F5 : Association de maïs et de niébé en lignes alternées : 2 lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé avec F5

2.5 CONDUITE DE L'ESSAI

Avant la réalisation des différentes méthodes de travail du sol (scarifiage, labour et billonnage), une dose de 2500 kg ha⁻¹ an⁻¹ de compost a été épandue à la volée dans les parcelles devant recevoir du compost avant le semis. Les semis (maïs et niébé) ont été effectués le 10 juillet et le 11 juillet respectivement en 2024 et en 2025 en lignes alternées. Avant le semis, les graines de niébé et les grains de maïs ont été enrobés avec le fongicide calthio (chlorpyrifos-éthyl). La densité de semis a été de 80 cm entre les lignes et 40 cm

entre les poquets de la même ligne soit 31250 poquets ha⁻¹ pour les deux spéculations. Un démariage à deux plants par poquet a été fait après la levée. Quatorze (14) Jours après le semis (JAS), le NPK a été appliqué par la technique de la microdose. L'urée a été apportée uniquement aux plants de maïs également par la technique de la microdose en deux fractions. La première fraction à 30 JAS et la deuxième fraction à 45 JAS. Les doses d'engrais minéraux des différents traitements ont été présentées dans le Tableau 2. En cas d'enherbement des parcelles, des sarclages à la daba ainsi que des désherbages à la main ont été réalisés. Pour chaque année, deux sarclages et un désherbage ont été réalisés. Pour lutter contre les pucerons (aphidés) du niébé (*Aphis craccivora* Koch), des traitements phytosanitaires du niébé ont été faits dès l'apparition des boutons floraux avec l'insecticide pacha 25 EC [Acétamipride (10 g/L) + Lambda cyhalothrine (15 g/L)] à la dose d'un (l) L ha⁻¹ mélangé avec 400 L d'eau. À la formation des gousses, un traitement est fait avec le K-Optimal [Lambda cyhalothrine (15 g/L) + Acétamipride (20 g/L)] à la dose d'un (l) L ha⁻¹ mélangé avec 300 litres d'eau. Les traitements ont été appliqués tôt les matins avant la levée du soleil.

2.6 PARAMETRES MESURES

La teneur en eau volumétrique dans chaque parcelle élémentaire a été mesurée ainsi que l'indice chlorophyllien des feuilles des plants de maïs. La teneur en eau volumétrique des parcelles a été mesurée à 50% et à 100% de floraison femelle des plants de maïs à l'aide d'un humidimètre à sonde (HyroSense II) dans les 10 premiers centimètres du sol. Une moyenne est obtenue à partir de trois mesures faites sur chaque parcelle utile suivant les diagonales. Quant à l'indice chlorophyllien, des mesures directes sont faites sur cinq feuilles de cinq plants de maïs à trois niveaux pris de manière aléatoire. Les mesures ont été faites à la montaison au niveau de chaque parcelle utile à l'aide d'un SPAD-mètre de modèle Konica Minolta SPAD-502. Les prises de mesure à l'aide de ce type d'appareil ont l'avantage d'être une méthode non destructive des feuilles contrairement aux méthodes chimiques traditionnelles. Ces mesures contribuent à optimiser la fertilisation et permettent d'évaluer l'état de sanitaire des plants, lequel fortement corrélé à la teneur en azote [27], [28]. Les mesures à l'aide des chlorophylle-mètres sont rapides et moins coûteuses et permettent un suivi de l'état nutritionnel et de l'application de l'azote [27], [29].

2.7 ANALYSE DES DONNEES

Le tableur Microsoft Excel a été utilisé pour saisir les données collectées. L'analyse des variances a été faite pour vérifier si les moyennes des traitements sont significativement différentes les unes des autres. Le logiciel SAS/STAT® a été utilisé pour l'analyse statistique des données. La probabilité de significativité critique a été de 0,05.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 RESULTATS

3.1.1 EFFETS DES FACTEURS TESTES SUR LES PARAMETRES MESURES

L'analyse de variance (ANOVA) a fait ressortir que l'humidité volumétrique des parcelles à 50% de floraison femelle du maïs a été affectée par le travail du sol en 2024 ($P = 0,003$). Cependant, en 2025, aucun effet significatif des facteurs testés ($P > 0,05$) n'a été mis en évidence sur l'humidité du sol à 100% de floraison femelle. Il en est de même pour l'interaction du travail du sol et du système de culture avec fertilisation ($P = 0,434$). L'indice chlorophyllien à la montaison a été affecté significativement par la variabilité annuelle ($P < 0,001$) et le système de culture avec fertilisation ($P < 0,001$). Aussi, ce même indice chlorophyllien a été significativement impacté par l'interaction du travail du sol et du système de cultures avec fertilisation ($P = 0,014$).

3.1.2 VARIATION DE L'HUMIDITE DU SOL

EFFET DU TRAVAIL DU SOL SUR L'HUMIDITE VOLUMETRIQUE DES PARCELLES A 50% DE FLORAIION FEMELLE EN 2024

Sur l'horizon 0-10 cm, les résultats ont montré que l'humidité volumétrique du sol a été plus faible sur les parcelles de scarifiage que sur les deux autres méthodes de travail du sol (labour et billonnage cloisonné). En effet, les taux d'humidité dans les parcelles de billonnage cloisonné (17,98%) et de labour (16,91%) sont significativement plus élevés que ceux des parcelles de scarifiage (14,28%) (Figure 2).

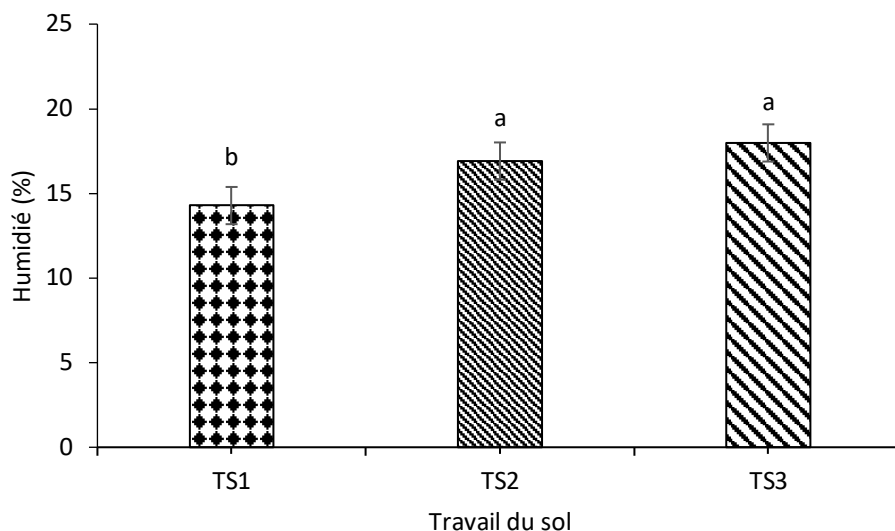


Fig. 2. Effet du travail du sol sur l'humidité volumétrique des parcelles à 50% de floraison femelle en 2024, Saria, Burkina Faso (Probabilité de l'analyse de variance: $P = 0,003$)

Note: TS1 = Travail minimum du sol; TS2 = Labour; TS3 = Billonnage cloisonné

3.1.3 VARIATION DE L'INDICE CHLOROPHYLLIEN DES PLANTS DE MAÏS

EFFET INTERACTIF DU TRAVAIL DU SOL ET DU SYSTEME DE CULTURE AVEC FERTILISATION DU SOL SUR L'INDICE CHLOROPHYLLIEN DES FEUILLES DU MAÏS A LA MONTAISON

Le scarifiage (TS1) a généré une stabilité de l'indice chlorophyllien des feuilles de maïs dans l'ensemble des systèmes de culture avec fertilisation à l'exception des parcelles n'ayant pas reçu de fertilisation (SC1-F1; SC2-F1) et des parcelles avec un système de culture associant deux lignes de maïs suivies de deux lignes de niébé et une fertilisation de F5 (SC2-F5) (Tableau 4).

Dans les parcelles labourées (TS2), les résultats indiquent que les indices chlorophylliens apparaissent similaires pour tous les niveaux système de culture avec fertilisation sauf dans les systèmes de culture avec fertilisation SC1-F1 (une ligne de maïs suivie d'une ligne de niébé sans fertilisation organique et minérale) et SC2-F1 (deux lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé sans fertilisation organique et minérale) avec les indices les plus faibles (24 pour SC1-F1 et 25,99 pour SC2-F1).

Aussi, les indices SPAD restent similaires dans pratiquement toutes les parcelles de billonnage cloisonné (TS3). Les résultats ont montré des indices chlorophylliens les plus élevés mais similaires dans les systèmes de culture avec amendement du sol mais des indices plus faibles encore dans les mêmes combinaisons et qui sont de 21,23 pour SC1-F1 et 20,49 pour SC2-F1.

Sur le billonnage cloisonné, la combinaison SC1-F5 a induit un taux d'évolution de 82,71% comparativement à SC1-F1 et de 89,31% par rapport à SC2-F1.

En moyenne, sur les dix systèmes de culture avec fertilisation organo-minérale du sol, les différentes méthodes de travail du sol ont montré une similitude des indices chlorophylliens dans les feuilles de maïs à la montaison. Les résultats indiquent également qu'en moyenne sur les trois méthodes de travail du sol, le système de culture SC1-F4 a favorisé des indices chlorophylliens plus élevés, des indices plus faibles dans les systèmes SC1-F1 (une ligne de maïs suivie d'une ligne de niébé sans fertilisation organique et minérale) et SC2-F1 (deux lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé sans fertilisation organique et minérale) et des indices intermédiaires dans les autres systèmes de culture avec fertilisation.

Tableau 4. Effet interactif du travail du sol (TS), du système de cultures avec fertilisation (SC-F) sur l'indice chlorophyllien à la montaison des feuilles de maïs, 2024 et 2025, Saria, Burkina Faso

Système de culture avec fertilisation	Indice chlorophyllien SPAD			Moyenne
	Travail minimum	Labour	Billonnage cloisonné	
SC1-F1	27,53cA	24bB	21,23bB	24,25c
SC1-F2	35,27abA	32,72aA	36,04aA	34,68ab
SC1-F3	35,75abA	35,11aA	35,35aA	35,41ab
SC1-F4	35,61abA	35,52aA	37,91aA	36,35a
SC1-F5	32,71abB	36,47aAB	38,79aA	35,99ab
SC2-F1	24,76cA	25,99bA	20,49bB	23,75c
SC2-F2	34,2abA	34,80aA	38,02aA	35,67ab
SC2-F3	36,25aA	34,80aA	37,07aA	36,04ab
SC2-F4	34,436abA	35,39aA	36,86aA	35,56ab
SC2-F5	31,97bA	33,73aA	35,61aA	33,77b
Moyenne	32,851A	32,85A	33,74A	

Les valeurs suivies de la même lettre en minuscule dans une même colonne et en majuscule dans une même ligne ne sont pas significativement différentes à $P \leq 0,05$.

3.2 DISCUSSION

3.2.1 EFFETS DES FACTEURS TESTES SUR L'HUMIDITE DU SOL

Le maïs est une céréale exigeante en eau pour sa culture. En effet, l'eau est cruciale pour sa croissance végétative et la production. Une gestion optimale de l'humidité est donc nécessaire pour la culture du maïs en contexte sahélien où la pluviométrie est souvent rare et parfois marquée par une répartition inégale dans le temps et dans l'espace. Le travail du sol dont le but est de mieux optimiser la gestion des eaux de pluie permet ainsi aux plantes de maïs un développement sain tout en garantissant un rendement meilleur. A 50% de floraison femelle, les résultats ont montré que le travail du sol a impacté significativement l'humidité des parcelles. En effet, sur les parcelles de labour et de billonnage cloisonné, les taux d'humidité, respectivement de 16,91% et de 17,98%, ont été les plus élevés par rapport au travail minimum du sol (14,28%). De ce fait, le travail du sol a brisé les contraintes du sol en améliorant sa porosité, ce qui a facilité l'infiltration de l'eau et de manière générale ses propriétés hydriques du sol. Des études faites sur le sorgho en association avec le niébé ont montré que le travail du sol améliore l'humidité du sol [30], [31].

L'humidité du sol à 50% de floraison femelle du maïs observée sur les parcelles de billonnage cloisonné a été plus importante. Le cloisonnement des billons réalisé à 30 JAS en constituant une barrière empêche le ruissellement des eaux de pluie permettant ainsi une augmentation de l'infiltration de l'eau dans les parcelles et une réduction de l'érosion hydrique. Les résultats indiquent que le taux d'humidité à 50% de floraison femelle des parcelles a été significativement influencé par le labour. Cela s'expliquerait par l'impact améliorant du labour sur la porosité et l'infiltration de l'eau. Par ailleurs, le niébé est une plante de couverture. Il contribue dans ce sens à conserver l'humidité du sol pendant une longue période au profit des plants de maïs [32], [33].

3.2.2 EFFETS DES FACTEURS TESTES SUR L'INDICE CHLOROPHYLLIEN DU MAÏS

Les résultats ont montré que l'indice SPAD des feuilles de maïs a été influencé par l'année de production et par l'effet interactif des méthodes de travail du sol et des systèmes de cultures associé à la fertilisation minérale et organique. Cela pourrait s'expliquer par l'effet positif interactif des modes de gestion de la santé des sols associant les modalités de travail du sol, les systèmes de cultures et la fertilisation organo-minérale. En effet, ces systèmes de culture influenceraient les réactions physiologiques et métaboliques qui se produisent au sein des plantes. En outre, la molécule de la chlorophylle a pour composant principal l'azote et une humidité optimale associée à une fertilisation équilibrée améliore la photosynthèse [34], [35], [36]. L'humidité du sol est un facteur influençant la teneur de la chlorophylle [34], [35]. A cet effet, le manque d'eau provoque un stress hydrique des plantes ayant pour conséquence la fermeture des stomates au niveau des racines, ce qui réduit l'absorption des éléments minéraux amenés par le flux d'eau. De plus, l'eau est par excellence le milieu idéal pour les réactions enzymatiques qui se déroulent dans les chloroplastes et responsables de la libération des précurseurs de la chlorophylle. C'est en ce sens que, les méthodes de travail du sol qui permettent une meilleure gestion de l'humidité pourraient contribuer à l'augmentation du taux de chlorophylle. Par ailleurs, des résultats de travaux de recherche antérieure ont montré que le stress hydrique influence significativement les teneurs en amidon dans les feuilles à tous les stades végétatifs [37]. Il a été également rapporté que l'indice chlorophyllien au niveau des feuilles étandard des plantes de blé a été augmenté avec le labour conventionnel comparativement au semis direct et au travail minimum du sol [38]. Des études en Chine ont conclu que le labour, seul ou associées à l'irrigation améliorent les teneurs en chlorophylle ainsi que le taux net de la photosynthèse par [39], [40]. Les engrais

minéraux et le compost apportent beaucoup d'azote aux plantes, ce qui les enrichit en concentration chlorophyllienne [41]. Aussi, la matière organique apportée au sol par la fertilisation organo-minérale améliore la capacité de rétention en eau du sol à travers l'effet « éponge » qu'elle crée, en empêchant la mise en place d'une croûte de battance [16]. Les résultats de la présente étude ont indiqué que le labour et le billonnage cloisonné ont généré les forts taux d'humidité. Cependant, d'après l'ANOVA, leur taux de chlorophylle reste identique à celui du scarifiage (travail minimum du sol). Cela dénote que l'humidité n'est pas le seul facteur pouvant influencer la concentration en chlorophylle des feuilles. Aussi, cette similitude pourrait s'expliquer par le fait que, durant les deux années de l'expérimentation, la pluviométrie respectivement de 910,6 mm et de 821,5 mm était optimale pour la culture céréalière et légumineuse.

Il existe une corrélation positive entre la teneur en chlorophylle dans les feuilles et l'azote [35]. Les feuilles vertes des plantes sont généralement celles ayant une forte teneur en chlorophylle (ayant emmagasiné une concentration suffisante en azote) et une forte capacité photosynthétique, ce qui indique une bonne santé foliaire. L'apport de la matière organique et des engrais minéraux sont une source d'éléments minéraux nutritifs. Les éléments minéraux des engrais chimiques sont immédiatement assimilables par les plantes tandis que le compost libère progressivement ces éléments nutritifs qui permettent aux plantes une meilleure croissance à chaque stade végétatif [33]. Aussi, les légumineuses sont réputées avoir la capacité de fixer de façon symbiotique l'azote atmosphérique et de le libérer au profit des céréales lorsqu'elles sont associées [42]. Les obtenus dans cette étude montrent que les parcelles ayant reçu des engrais chimiques, du compost et une alternance du maïs et du niébé (une ligne ou deux lignes) ont celles qui ont connu les indices chlorophylliens les plus élevés par rapport aux parcelles sans compost et d'engrais minéraux, quelle que soit la méthode de travail du sol. Cela serait dû à l'action conjuguée du travail du sol, de l'association culturale (maïs-niébé) et surtout de l'amendement organo-minéral. Ces résultats corroborent ceux de qui ont montré que Le travail du sol combiné aux apports organo-minéraux permettent de relever l'humidité du sol et par conséquent l'indice chlorophyllien des feuilles de sorgho en association avec le niébé, comme rapporté dans des travaux de recherche antérieure [31].

4 CONCLUSION

L'étude a été conduite à la station de recherches environnementales et agricoles de Saria en 2024 et en 2025, en zone soudano-sahélienne pour évaluer les effets du travail du sol et de l'association maïs-niébé sur l'humidité du sol et l'assimilation chlorophyllienne du maïs. Les résultats ont montré qu'à la première année, le labour et le billonnage cloisonné permettent d'avoir des taux d'humidité à 50% de floraison femelle significativement plus élevés que le scarifiage. Cependant, à 100% de floraison femelle de la deuxième année de la campagne agricole, le travail du sol n'a pas eu d'effets significatifs sur l'humidité du sol. En outre, le système de culture alternant une ligne de maïs et une ligne de niébé avec un apport de compost et d'engrais minéraux permet d'observer des indices chlorophylliens dans les feuilles de maïs plus élevés quel que soit le travail du sol sur l'ensemble des deux années. En moyenne, sur les dix systèmes de culture avec fertilisation organo-minérale du sol, les différentes méthodes de travail du sol ont montré une similitude des indices chlorophylliens dans les feuilles de maïs à la montaison. Les résultats indiquent également qu'en moyenne sur les trois méthodes de travail du sol, le système de culture SC1-F4 (une ligne de maïs et une ligne de niébé avec un apport de compost et d'engrais minéraux) a favorisé des indices chlorophylliens plus élevés, des indices plus faibles dans les systèmes SC1-F1 (une ligne de maïs suivie d'une ligne de niébé sans fertilisation organique et minérale) et SC2-F1 (deux lignes de maïs suivies de 2 lignes de niébé sans fertilisation organique et minérale) et des indices intermédiaires dans les autres systèmes de culture avec fertilisation. Au regard de ces résultats, le labour et le billonnage cloisonné dans les systèmes de culture alternés d'une ligne avec une application de 2500 kg ha⁻¹ de compost et 200 kg ha⁻¹ de NPK sur le maïs + 100 kg ha⁻¹ de NPK sur le niébé + 200 kg ha⁻¹ d'urée sur le maïs (SC1-F4) peuvent être recommandés pour une optimisation des systèmes de production à base de maïs et du niébé en culture associée dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso

CONFLIT D'INTERET

Tous les auteurs ayant pris part à cette étude déclarent l'inexistence de conflits d'intérêts.

CONTRIBUTION DES AUTEURS

De la mise en place du protocole de recherche en passant par les travaux de terrain et la rédaction du manuscrit, tous les auteurs ont marqué leur engagement sans faille et leur participation.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso pour son soutien administratif et matériel et le Programme de Laboratoire d'Innovation et d'Intensification Durable (accord de coopération n° AID-OAA-L-14-00006) (SIIL-Burkina) pour leur contribution financière à la réalisation de cette étude et leur soutien matériel et administratif dans la conduite de l'étude.

REFERENCES

- [1] FAO, «Cultures et produits animaux [Base de données]», Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT, 2024. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data>.
- [2] Direction Générale des Études et des Statistiques Sectorielles (DGESS), «Rapport sur les finances publiques gestion 2023», Burkina Faso, 2023.
- [3] A. Bationo and Waswa, B. S., «New challenges and opportunities for integrated soil fertility management in Africa», In A. Bationo, B. Waswa, J. M. Okeyo, F. Maina & J. Kihara (Eds.), *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa: Exploring the Scientific Facts*, pp. 3-17, 2011, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_.
- [4] S. Traoré, K. Ouattara, U. Ilstedt, M. Schmidt., A. Thiombiano, A. Malmer and G. Nyberg, «Effect of land degradation on carbon and nitrogen pools in two soil types of a semi-arid landscape in West Africa», *Geoderma*, vol. 241–242, pp. 330–338, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.027>
- [5] B. Bacýé, H. S. Kambire and A. S. Somé, «Effets des pratiques paysannes de fertilisation sur les caractéristiques chimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé en zone cotonnière à l'Ouest du Burkina Faso», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 13, no. 6, pp.2930-2941, 2019. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.39>.
- [6] MARAH (Ministère de l'Agriculture, des Ressources Animales et Halieutiques), «Offensive agropastorale et halieutique 2023-2025», Burkina Faso, 2025.
- [7] MEFP (Ministère de l'Economie, des Finances et de la Prospective), «Rapport sur les finances publiques gestion 2024», Burkina Faso, 75p, 2024.
- [8] INSD (Institut national de la statistique et de la démographie), «Cinquième Recensement général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso», synthèse des résultats définitifs. Ouagadougou, Burkina Faso, 133p, 2022.
- [9] MAAHM (Ministère de l'Agriculture, des Aménagements Hydro agricoles et de la Mécanisation), «Tableau de bord statistique de l'agriculture 2021», Ouagadougou, Burkina Faso, 83p, 2021.
- [10] M. B. Pouya, M. O. Savadogo, J. Ouédraogo, I. Sermé, G. Vognan, D. Dakuo, M. P. Sedogo and F. Lompo, «Déterminants socio-économiques de la dégradation des sols et de l'adoption des technologies de gestion de la fertilité des sols selon les perceptions paysannes dans les zones cotonnières du Burkina Faso», *Asian Journal of Science and Technology*, vol. 11. no. 06, pp. 11003–11011, 2020.
- [11] World Bank, «Population growth (annual %) – Sub-Saharan Africa», *World Bank Open Data*, 2021. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW?locations=ZG>.
- [12] N. E. Kohio, G. A. Toure, P. M. Sedogo, K. J. M. Ambouta, «Contraintes à l'adoption des bonnes pratiques de gestion durable des terres dans les zones soudaniennes et soudano-sahéliennes du Burkina Faso» *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 2982-2989, 2017.
- [13] A. Traoré, F. Saba, K. Traoré, A. A Bandaogo, P. Bazongo and O. Traoré, «Effects of soil preparation techniques and organic-mineral fertilization on maize (*Zea mays* L.) yields in western Burkina Faso in the context of climate change», *International Journal of Biosciences*, vol. 27, no. 3, pp. 107–115, 2025. <https://doi.org/10.12692/ijb/27.3.107-115>.
- [14] IFDC (International Fertilizer Development Center), «Recommandations 2018 d'engrais pour l'Afrique de l'Ouest», *IFDC*, 42p, 2018.
- [15] I. Sermé, M. B. Pouya, I. Nignan and K. Ouattara, Effet de l'application d'engrais solubles NPK et de l'Urée en microdose sur le soja et le maïs au Burkina Faso. *Revue Science et technique, Sciences naturelles et appliquées*, Vols. 34 à 37, ISSN 1011-6028.
- [16] S. Pale, A. Barro, M. Koumbem, A. Sere and H. Traoré, «Effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur les rendements du mil en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso» *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 497–510 2021. <https://doi.org/10.4314/ibis.v15i2.10>.
- [17] E. Hien, D. Masse., W.T. Kaboré, P. Dugué and M. Lepage, «Soil organic inputs and water conservation practices are the keys of the sustainable farming systems in the sub-Saharan zone of Burkina Faso», In A. Bationo (Ed.), *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa* pp. 121, 2011, Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_121.
- [18] D. Somé, E. Hien, K. Assigbetse, J. J. Drevon and D. Masse, «Dynamique des compartiments du carbone et de l'azote dans le sol cultivé en niébé et sorgho dans le système zaï en zone Nord-soudanienne du Burkina Faso», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 9, no. 2, pp.954–969, 2015. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i2.32>.
- [19] E. Roose, «Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie», *IRD Editions, Institut de Recherche pour le Développement*, Montpellier, pp. 542, 2015.
- [20] B. Van Wesemael, C. Chartin, M. Wiesmeier, M. von Lütow, E. Hobbey, M. Carnol, I. Krüger, M. Campion, N. Roisin, S. Hennart and I. Kögel-Knabner, «An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils», *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 274, pp. 62-75, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.005>
- [21] F. O. Ayuke, Z. Zida and D. Lelei, «Effects of soil management on aggregation and organic matter dynamics in sub-Saharan Africa», *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, vol. 19, no. 1, pp. 13992–14009, 2019. <https://doi.org/10.18697/ajfand.84.BLFB1002>.
- [22] D. Guébré, S. Traoré, E. Hien, D. Somé, B.A. Bationo and M. Wiesmeier, Soil macrofaunal activity, microbial catabolic limitations and nutrient cycling in cropping systems amended with woody residues and nitrogen inputs. *Pedobiologia*, vol. 83, pp. 150686, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150686>.

- [23] L. Bedoussac, E. P. Journet, H. Hauggaard-Nielsen, C. Naudin, G. Corre-Hellou, E. S. Jensen, L. Prieur and E. «Justes, Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming: A review», *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 35, no. 3, pp. 911–935, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>.
- [24] K. F. Zongo, E. Hien, B. T. Maré and D. Guébré, «Performance de l'association mixte sorgho-niébé sur les productivités du sorgho et des sols en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 15, no. 3, pp. 987–1005. 2021 <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i3.12>.
- [25] M. Gao, X. Wang, R. Chen, H. Gao, X. Wang and H. Liu, «Optimization of water and fertilizer management on the intercropping system between maize and mung bean to improve photosynthetic characteristics & water use and to increase plant yield», *Frontiers in Plant Science*, vol. 16, Article 1597198, 2025. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1597198>.
- [26] J.F. Pierre, L. Latournerie-Moreno, R. Garruña, A. M. C. Laboski, L. K. Jacobsen, R. Us-Santamaría and E. Ruiz-Sánchez, «Effect of Maize–Legume Intercropping on Maize Physio-Agronomic Parameters and Beneficial Insect Abundance», *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, vol. 14, no. 19, pp. 12385, 2022. <https://doi.org/10.3390/su141912385>.
- [27] F. S. Alessana, M. B. S. Edna, D. C. S. Matheus, P. S. William, J. A. D. S. Tonny and D. N. F. Lorraine, «Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants», *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 9, no. 12, pp. 1148–1151, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1148-1151>.
- [28] F. Ben Abdallah, W. Philippe and J-P. Goffart, Utilisation de la fluorescence chlorophyllienne pour l'évaluation du statut azoté des cultures (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, vol. 20, no. 1, pp. 83–93, 2016. <https://doi.org/10.25518/1780-4507>.
- [29] M. M. Akhter, A. Hossain, J. Timsina, D. S. J. A. Teixeira and M. S. Islam, Chlorophyll meter – a decision-making tool for nitrogen application in wheat under light soils. *International Journal of Plant Production*, vol. 10, no. 3, pp. 289–302, 2016. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2016.2898>.
- [30] R. Zougmore, A. Jalloh and A. Tioro, «Climatesmart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: a review of evidence and analysis of stone bunds and zai techniques», *Agriculture & Food Security*, vol. 3, no. 16, pp. 1-8, 2014. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-3-16>.
- [31] M. Koumbem, S. Pale, E. Hien, D. Yonli, H. Traore, G. Pale, V.V Prasad, B. J. Middendorf, «Effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur l'humidité du sol et l'assimilation chlorophyllienne du sorgho en culture associée avec le niébé», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 16, no. 5, pp. 2396–2412, 2022. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v16i5.45>.
- [32] CILSS (Comité permanent Inter- États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel), «Bonnes pratiques agro-sylvo pastorales d'amélioration durable de la fertilité des sols au Burkina Faso», CILSS, Ouagadougou, 194 p, 2012.
- [33] M. Koumbem, «Contribution des systèmes de culture et de la fertilisation organo-minérale à la productivité du sorgho et du niébé en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso», Thèse de doctorat unique, Université Joseph KI-ZERBO, Ouagadougou, Burkina Faso, 158p, 2023.
- [34] W. G. Hopkins, «Physiologie végétale», *Editions De Boeck Supérieur*, ISBN: 978-2-7445-0089-3, 628 p, 2003.
- [35] K. Habiba, Z. Nasr, A. Khaldi, S. Y. Woo, M. Nouri, MN. Rejeb, Efficience d'utilisation de l'eau et de l'azote par les plants de chêne-liège (*Quercus suber* L.), IOBC/wprs Bulletin 76 pp. 35–42, 2012.
- [36] Z. Kaboré, A. P. Kihindo, H. R. Bazie, R. F. Ouédraogo, D. Dianou and G. Zombré, Effet de l'inoculation de *Rhizobium vignae* sur la physiologie et l'agromorphologie de la variété NIIZWE de niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) soumise à un stress hydrique 142 aux stades végétatifs et floraison. *Afrique SCIENCE*, vol. 14, no. 1, pp. 334 – 350. ISSN 1813 548X, 2018. DOI: <http://www.afriquescience.inf>.
- [37] P. P. Somé, E. Hien, K. Tozo, G. Zombré and D. Dianou, «Effets de six composts sur les réponses physiologiques, biochimiques et agronomiques du niébé *Vigna unguiculata* L. Walp var. KVX. 61.1. au déficit hydrique», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 8. no. 1, 2014. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i1.4>.
- [38] J. Buczek, D. Migut and M. Jańczak-Pieniżek, «Effect of soil tillage practice on photosynthesis, grain yield and quality of hybrid winter wheat», *Agriculture*, vol. 11, no. 6, pp. 479, 2021. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060479>.
- [39] Z. Liu, K. Zhang, C. Huang and J. Sun, «Effects of different tillage and irrigation methods on photosynthetic characteristics of maize», *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 33, no. 4, pp. 213–220, 2019. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.030>
- [40] H. X. Li, Y. F. Cheng, J. X. Feng, G. L. Fu, G. L. Liu, P. Liu, H. Ren, H. Z. Wang, B. Zhao and G. Li, «Effects of tillage methods on photosynthetic performance of different functional leaf groups of summer maize in coastal saline-alkali farmland», *Photosynthetica*, vol. 62, no. 4, pp. 339–350, 2024. <https://doi.org/10.32615/ps.2024.037>
- [41] Z. Halidou, Z. Hamidou, Contribution du niébé et des fumures organiques et minérales à la nutrition azotée et aux rendements du mil dans les systèmes de cultures en zone sahélo-soudanienne au Niger. Thèse de Doctorat en développement rural, Université Nazi Boni, Burkina Faso, 128p, 2017.
- [42] R. Lahmar, B.A. Bationo, N. Dan Lamso, Y. Guéro and P. Tittonell, «Tailoring Conservation Agriculture Technologies to West Africa Semi-Arid Zones: Building on Traditional Local Practices for Soil Restoration» *Field Crops Research*, vol. 132, pp. 158-167. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.013>.