

Qualité agrochimique des litières des arbres d'ombrage du caféier et réponse de la culture de soja à leur application sur un ferralsol acide du Burundi

Soter NDIHOKUBWAYO^{1*}, Rémégie NIYONGABIRE¹, Salvator KABONEKA¹,
Bernadette HABONIMANA¹, Anaclet NIBASUMBA² et Heidi Elisabeth MEGERLE³

¹ Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie, Département des Sciences et Technologies de l'Environnement, Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales, BP 2940 Bujumbura, Burundi

² Université du Burundi, Institut Supérieur de Formation Agricole, BP 241 Gitega, Burundi

³ Université de Foresterie de Rottenburg am Neckar, D - 72108 Rottenburg am Neckar, Allemagne

(Reçu le 19 Mai 2023 ; Accepté le 08 Août 2023)

* Correspondance, courriel : ndihokubwayosoter@yahoo.fr

Résumé

Cette étude a pour objectif d'évaluer la qualité chimique des litières d'arbres agroforestiers associés au café et de tester leur effet sur le rendement du soja. La méthodologie a consisté en une collecte de la litière foliaire morte sous six arbres d'ombrage dans la commune de Rutegama (au Burundi). Elle a été ensuite séchée et broyée. Leurs poudres ont été analysées au laboratoire pour en déterminer la teneur en éléments nutritifs, puis utilisées dans un essai de fertilisation du soja selon un dispositif en blocs complètement randomisés avec quatre répétitions. Les résultats de laboratoire ont montré que, par rapport aux autres essences, la litière de *Ficus thonningii* présente moins de limitations en éléments nutritifs. Les résultats de l'essai ont montré que les six litières utilisées ont donné des rendements en grains de soja (variant entre 475,7 kg/ha et 750,3 kg/ha) qui ne différaient pas significativement de celui du fumier de ferme (789 kg/ha) ($p > 0,05$). Tenant compte du rang moyen pour chaque composante du rendement (nombre de gousses par plant, nombre de grains par gousse, poids de mille grains, et rendement en grains de soja), deux essences venaient en tête du classement : *Persea americana* et *F. thonningii*. Il ressort de cette recherche que l'utilisation de ces deux essences comme arbres d'ombrage du caféier est à promouvoir.

Mots-clés : germination, nodulation, rendement, café d'ombre, Burundi.

Abstract

agrochemical quality of coffee shade tree litter and the response of soybean to their application on an acid ferralsol in Burundi

This study aims to evaluate the chemical quality of agroforestry tree litters associated with coffee and to assess their ability to increase crop yields through a trial on soybean. Dead leaf litters were collected under six shade trees in the commune of Rutegama (in Burundi), then dried and ground. They were analyzed in the laboratory to determine their nutrient contents and then used in a soybean fertilization trial through a completely randomized block design with four replicates. Laboratory results showed that *Ficus thonningii* had

less limitations in terms of nutrients contents compared to the other species. Results from the trial revealed that soybean yield from farm manure (789 kg/ha) is in the same group as the yields from the six tree litters (from 475.7 to 750.3 kg/ha) ($p > 0.05$). The average of the ranks for each yield component (number of pods per plant, number of grains per pod, thousand grain weight, and soybean grain yield) showed that two species topped the ranking: *Persea americana* and *F. thonningii*. From this study, it should be considered that the integration of the two species as coffee shade trees be encouraged.

Keywords : *germination, nodulation, yield, shade coffee, Burundi.*

1. Introduction

Le caféier (*Coffea arabica* L.) prend ses origines dans les forêts de montagne en Egypte. Les premières plantations de caféier se trouvaient donc sous couvert forestier ou sous arbres d'ombrage pour reproduire ses conditions d'origine. Cependant, pour répondre à la demande du marché, l'intensification de la culture du café a été introduite et a conduit à la monoculture [1]. Dès son introduction au Burundi, il était formellement interdit d'associer quoi que ce soit au caféier [2]. Actuellement, le paysage caféicole burundais laisse voir des arbres d'ombrage. La population les intègre dans les caféiers parce qu'elle leur reconnaît de nombreux avantages. En effet, les arbres d'ombrage créent un microclimat frais dû au bilan hydrique positif qu'ils créent [3], ainsi qu'à la réduction de la vitesse du vent et de la dispersion des agents pathogènes [4]. Au Burundi, certaines essences comme par exemple *Ficus thonningii* gardent leurs feuilles durant la saison sèche ; elles sont donc utilisées dans l'alimentation animale en cette période où les pâturages sont secs. Par ailleurs, les branches des arbres d'ombrage sont coupées et utilisées comme tuteurs, surtout pour le haricot volubile qui est actuellement le plus cultivé. En outre, les arbres fruitiers produisent des fruits qui, une fois vendus, peuvent procurer un revenu égal ou même supérieur à celui issu de la vente du café produit. L'autre avantage reconnu aux arbres est leur capacité d'augmenter la fertilité du sol par le biais de la litière foliaire qu'ils y déposent, ainsi que leur participation au recyclage des éléments nutritifs de par leurs racines qui explorent les horizons plus profondes et extraient des éléments nutritifs qui échapperaient aux caféiers. Cette capacité constitue d'ailleurs une caractéristique désirée pour chaque arbre d'ombrage [5]. Les arbres d'ombrage sont aussi bénéfiques pour le rendement et la qualité du café produit [6]. Au Burundi, l'utilisation de la matière organique pour améliorer la production agricole a été proposée, et la meilleure pratique est la combinaison des matières organiques et des engrais minéraux. La création de l'unique usine FOMI (Fertilisation Organo-Minérale) est un signe probant de l'engagement du Gouvernement du Burundi dans cette voie. Les recommandations d'usage au Burundi préconisent l'incorporation au sol d'au moins 10 tonnes de matière organique fraîche. Ces matières organiques proviennent essentiellement des élevages ou des résidus des cultures compostés ou non. Or, il s'observe de plus en plus une réelle compétition pour les résidus des cultures entre la fertilisation des cultures et l'alimentation animale, spécialement en cette période où le Burundi a voté une loi obligeant la conduite de l'élevage des animaux en stabulation permanente. Ainsi, les quantités de résidus de cultures destinées aux caféières diminuent progressivement, observation par ailleurs déjà faite pour l'ensemble de la région tropicale [7]. Les arbres d'ombrage du caféier constituent donc une autre source d'éléments nutritifs utile aux caféiers. Mais la qualité de la litière diffère d'une essence à une autre. En outre, peu d'études de ce genre ont été conduites au Burundi, sauf sur quelques légumineuses fixatrices d'azote [8]. Or, il se pourrait que les arbres qui ont été les plus vulgarisés en milieu rural burundais, comme par exemple *Grevillea robusta*, n'aient pas nécessairement la meilleure qualité de la litière produite. Cette étude constitue donc une contribution importante dans la connaissance de la qualité des arbres agroforestiers au Burundi. Les essences utilisées dans cette étude ont été tirées d'une liste des essences les plus présentes dans au moins 5 % des exploitations caféicoles de la zone d'étude [9]. Cependant, comme le caféier est une culture pérenne

et à cyclicité marquée [1], les effets de la litière sur cette culture sont difficiles à évaluer. Une culture annuelle, le soja, a été utilisée dans cette étude. Le soja a l'avantage d'être tolérant au stress hydrique. Cette culture, de grande importance mondiale, est aussi très importante pour le Burundi où le taux de malnutrition est élevé. En effet, le soja est composé d'environ 40 % de protéines et de 20 % d'huile. C'est un véritable producteur d'huile, loin devant les autres cultures oléagineuses. Sur le continent africain, l'Afrique du Sud est le plus grand producteur de soja (environ 1,5 millions de tonnes par an) au moment où le Burundi produit environ 2500 tonnes par an [10]. Au moment où le soja est sensible à une forte acidité du sol, les sols du Burundi sont essentiellement acides. Et le sol utilisé dans cette étude est acide. Au Kenya, les faibles performances observées pour le soja ont été attribuées à la forte acidité qui aurait conduit à la fixation des éléments nutritifs, les rendant donc indisponibles pour la nutrition de la plante [11]. Pour de tels sols, il faut des amendements organiques car ils fournissent les éléments nutritifs nécessaires pour la nutrition des plantes et leur croissance. Ceci a été aussi observé dans un essai de soja où les meilleures performances de croissance et de rendement ont été obtenues pour le traitement de fumier de ferme [12]. D'un côté, une litière de bonne qualité est celle qui contient et qui fournit à une culture donnée les éléments nutritifs dont elle a besoin, et au moment opportun. Ceci est très lié au taux de décomposition de la litière. D'un autre côté, les analyses ont montré que les éléments nutritifs contenus dans les plantes se trouvent généralement dans une certaine fourchette et qu'il y a un mécanisme physiologique de contrôle de l'absorption, de telle sorte qu'il y existe des seuils au-delà desquels la croissance végétale est affectée [13]. Certains auteurs [14] ont donné des valeurs pour les macronutriments et les micronutriments se trouvant dans les plantes en général, d'autres comme [15] fournissent des valeurs usuelles des éléments nutritifs se trouvant dans les légumes, les fruits, les plantes ornementales, etc. pour les îles Hawaï. Mais on connaît très peu pour les arbres agroforestiers, spécialement ceux associés au café au Burundi. C'est dans ce contexte que cet article a pour objectif d'étudier la qualité chimique des litières d'arbres agroforestiers associés au café et leur aptitude à améliorer la fertilité du sol et ainsi l'augmentation des rendements des cultures à travers un essai sur le soja. La réponse du soja est étudiée en termes de germination, de nodulation et de rendement en grains.

2. Matériel et méthodes

2-1. Sol de l'essai et échantillonnage du sol

Cette recherche a été menée sur la colline Munanira de la commune Rutegama en province Muramvya (Burundi). L'essai était installé à 29°46'12" de longitude Est et à 3°16'37,2" de latitude sud. Le sol de l'essai n'avait jamais eu d'antécédent de légumineuses. L'échantillonnage a consisté en la prise, à l'horizon 0-30 cm, de cinq échantillons élémentaires qui ont été mélangés pour constituer un échantillon de sol composite. Ce dernier a subi des analyses de laboratoire pour le pH, la conductivité électrique, le carbone total, l'azote total, le phosphore assimilable, la capacité d'échange cationique (CEC) et les cations échangeables: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+} et H^+ . Les détails sur les méthodes d'analyse au laboratoire peuvent être trouvés dans [8]. L'interprétation des résultats d'analyse de sols s'inspire des normes proposées par [16].

2-2. Prise d'échantillons de litière et leur analyse au laboratoire

Les feuilles sèches tombées des arbres d'ombrage étaient soigneusement collectées. Les arbres étaient choisis selon leur abondance dans les exploitations caféicoles où ils étaient présents au moins dans 5 % des exploitations visitées [9]. Ces arbres sont : *Albizia gummifera* (J.F. Gmel) C.A.Sm, *Ficus thonningii* Blume, *Grevillea robusta* A. Cunn. ex. R. Br., *Maesopsis eminii* Engl, *Markhamia lutea* (Benth) K. Schum, et *Persea americana* Mill. Les feuilles d'une même essence étaient mises ensemble, séchées à l'air sous couvert et réduites en poudre à l'aide du broyeur de marque REITZ. Les analyses chimiques réalisées étaient la détermination des taux du carbone total, de l'azote total, du phosphore, du potassium, du calcium et du magnésium. L'interprétation des résultats d'analyse des litières a été faite en référence aux normes [13, 14].

2-3. Dispositif expérimental

L'essai a été installé selon un dispositif en blocs aléatoires complet avec 4 répétitions. La parcelle expérimentale élémentaire était longue de 1,6 m et large de 0,8 m. Il y avait 0,5 m entre parcelles, tandis que la distance entre deux blocs contigus était de 1 m. La variété de soja utilisée est Yezumutima. Dix traitements ont été testés comme le montre le **Tableau 1** :

Tableau 1 : Traitements de l'essai sur le soja

Traitement	Dénomination
T ₀ (Témoin)	Sol seul
T ₁ (Fumier)	Fumier d'étable
T ₂ (FOMI)	Fertilisants Organo-Minéraux (FOMI) de type Imbura
T ₃ (DAP)	Diammonium Phosphate (DAP)
T ₄ (Grevillea)	Litière de <i>Grevillea robusta</i>
T ₅ (Ficus)	Litière de <i>Ficus thonningii</i>
T ₆ (Maesopsis)	Litière de <i>Maesopsis eminii</i>
T ₇ (Markhamia)	Litière de <i>Markhamia lutea</i>
T ₈ (Persea)	Litière de <i>Persea americana</i>
T ₉ (Albizia)	Litière d' <i>Albizia gummifera</i>

2-4. Pratiques culturales

Le labour, effectué le 20 novembre 2020, était suivi par l'application de la dolomie (39 % CaO et 20 % MgO) au taux de 1,5 tonnes par ha. Le semis a été effectué le 30 novembre et le 1er décembre 2020. Juste avant le semis, les dix traitements ont été appliqués au sol de la manière suivante : (i) 100 kg de DAP (18-46-0); (ii) 150 kg de FOMI Imbura dont la formule est : N-P₂O₅- K₂O-CaO-MgO: 9-22-4-13-2; (iii) 10 tonnes de matière fraîche par ha de fumier d'étable et (iv) 2,5 tonnes par ha de matière sèche pour les litières sous forme de poudre. Ceci est l'équivalent de 10 tonnes de matière fraîche de litière. Tous les traitements étaient appliqués directement et mélangés au sol. Le semis était fait en lignes à raison de 3 graines par poquet. Les écartements étaient de 40 cm x 20 cm. Les plants ont été sarclés en février 2021, et la récolte a eu lieu le 16 mars 2021.

2-5. Schéma de la parcelle expérimentale et évaluation des paramètres étudiés

Pour pouvoir évaluer la nodulation et le rendement du soja, un échantillonnage destructif a été réalisé selon la **Figure 1**. Les nodules étaient manuellement séparés des racines, comptés puis séchés à l'étuve à 65°C pendant 48 heures. Ils étaient pesés à leur sortie de l'étuve. Le nombre de gousses par plant ainsi que le nombre de grains par gousse étaient aussi comptés. Les grains de chaque plante étaient pesés, tandis que le poids de mille grains était calculé en appliquant la règle de trois simple. Le rendement en grains était calculé selon **l'Équation (1)** :

$$\text{Rendement en grains} = \frac{\text{Poids des grains de } X \text{ plantes} \times \text{Densité/ha}}{\text{Nombre de plants récoltés}} \quad (1)$$

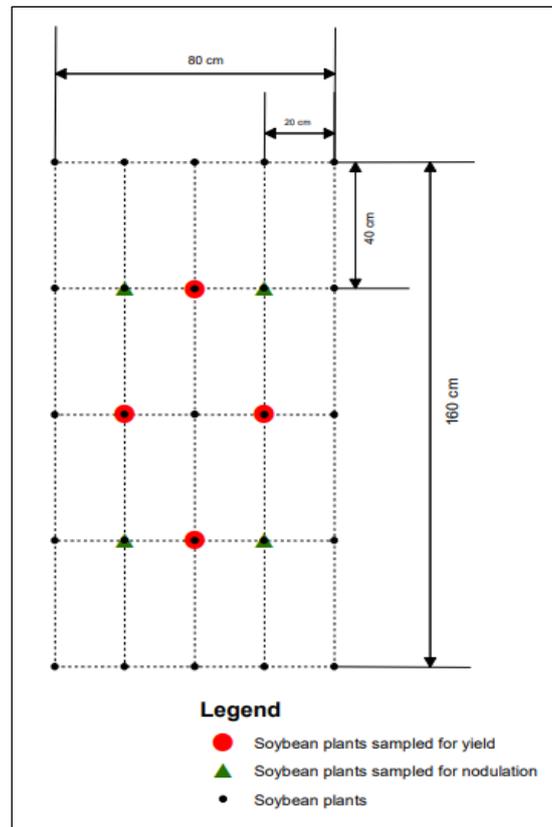


Figure 1 : Schéma de la parcelle expérimentale

2-6. Analyse statistique des données

Après avoir vérifié les hypothèses d'homogénéité de la variance selon le test de Levene, la comparaison des moyennes a été faite en recourant à l'ANOVA 1. En cas de non-respect de l'homogénéité de la variance, le test robuste de Welch a été utilisé. Pour les résultats significatifs ($p < 0,05$), la classification en groupes de moyennes homogènes était faite en utilisant le test de Fisher. Finalement, les comparaisons par paires ont été réalisées en recourant au test de Tukey HSD. Toutes ces analyses étaient faites en utilisant le logiciel R.

3. Résultats

3-1. Caractéristiques physico-chimiques du sol

Les résultats des analyses chimiques du sol montrent les propriétés suivantes : pH_{eau} (4,6), C (1,9 %), N (0,3 %), Ratio C/N (6,9), CEC (11,9 cmol_c/kg de sol), Al³⁺ (0,05 cmol_c/kg de sol), H⁺ (0,5 cmol_c/kg de sol), P-Olsen (8,1 mg/kg de sol), K échangeable (0,59 cmol_c/kg de sol), Ca échangeable (4,8 cmol_c/kg de sol) ainsi que Mg échangeable (1,37 cmol_c/kg de sol). Le sol (0-30 cm) est de texture argilo-sableuse (sable : 51 %, argile : 40 % et limon : 9 %) en se servant du triangle textural USDA (United States Department of Agriculture).

3-2. Qualité chimique des litières

Selon les résultats d'analyses chimiques des 6 litières (**Tableau 2**), les teneurs en azote (N) sont comprises entre 0,82 % et 2,19 %, les teneurs en phosphore (P) entre 0,0125 % et 0,530 %, les teneurs en potassium (K) entre 0,11 % et 1,46 %, les teneurs en calcium (Ca) entre 0,12 % et 0,52 %, et les teneurs en magnésium

(Mg) entre 0,09 % et 0,50 %. Le pH des litières est compris entre 5,22 et 7,13 tandis que le carbone (C) est compris entre 28,2 % et 37,3 %. La salinité est comprise entre 0,98 dS/m et 3,40 dS/m. Les ratios entre ces éléments ont été également calculés (**Tableau 3**) pour avoir une information supplémentaire quant aux équilibres entre éléments.

Tableau 2 : Composition chimique des litières issues des arbres d'ombrage du caféier

Espèce	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	pH	C (%)	Salinité (dS/m)
<i>Ficus thonningii</i>	1,44	0,0445	1,46	0,52	0,46	7,13	28,2	3,40
<i>Persea americana</i>	1,07	0,0444	0,11	0,43	0,37	6,25	37,1	0,98
<i>Maesopsis eminii</i>	2,19	0,0376	0,61	0,38	0,50	6	29,3	1,55
<i>Markhamia lutea</i>	1,4	0,0506	0,41	0,45	0,26	6,22	33,5	1,51
<i>Grevillea robusta</i>	0,82	0,0125	0,26	0,28	0,09	5,22	37,3	1,79
<i>Albizia gummifera</i>	2,12	0,0530	0,69	0,12	0,18	5,99	30,6	2,44
Normes								
[14]	2 - 5	0,2 - 0,5	1-5	0,1-1	0,1-0,4	7-9		4
[13]	1 - 5	0,1-5		0,2-1	0,1-0,4			

Tableau 3 : Ratios entre éléments des litières issues des arbres d'ombrage du caféier

Espèce	C/N	C/P	Ca/Mg	Mg/K	(Ca+Mg)/K
<i>Ficus thonningii</i>	19,6	633,5	1,13	0,32	0,67
<i>Persea americana</i>	34,6	834,7	1,16	3,36	7,27
<i>Maesopsis eminii</i>	13,4	779,5	0,76	0,82	1,44
<i>Markhamia lutea</i>	23,9	662,3	1,73	0,63	1,73
<i>Grevillea robusta</i>	45,5	2984,8	3,11	0,35	1,42
<i>Albizia gummifera</i>	14,4	576,4	0,67	0,26	0,43
Norme	20-30	200	1-2,5	0,08-0,1	0,2-0,3

3-3. Valeur agronomique des litières issues des arbres d'ombrage du caféier

3-3-1. Taux de germination

Persea americana a donné le taux de germination le plus élevé (64,3 %) tandis que le plus faible taux a été observé pour le DAP (46,7 %). Exception faite pour *Ficus thonningii*, toutes les litières ont montré des taux de germination supérieurs à celui des traitements avec fertilisants minéraux (**Tableau 4**). Il n'y a pas eu de différences significatives entre traitements en termes de taux de germination ($p = 0,18$).

Tableau 4 : Taux moyens de germination du soja pour chaque traitement

Traitement	Taux de germination (%)
T ₈ (Persea)	64,3 ± 12,9
T ₆ (Maesopsis)	63,7 ± 2,5
T ₉ (Albizia)	62,3 ± 13,2
T ₀ (Témoin)	61,7 ± 5,7
T ₁ (Fumier)	61,7 ± 2,7
T ₇ (Markhamia)	59,3 ± 14,6
T ₄ (Grevillea)	54,3 ± 16,2
T ₂ (FOMI)	53,7 ± 2,5
T ₅ (Ficus)	48,0 ± 4,9
T ₃ (DAP)	46,7 ± 14,5

3-3-2. Nodulation

Le nombre moyen de nodules était compris entre 0,7 pour *F. thoningii* et 10,3 pour FOMI (**Tableau 5**). Toutefois, le nombre moyen de nodules produits n'était pas significativement différent ($p = 0,37$). Le poids des nodules par plant était compris entre 10 mg pour *F. thoningii* et 50 mg pour le témoin (**Tableau 5**). Pour ce paramètre, l'homogénéité de la variance n'a pas pu être prouvée car le test de Levene était significativement différent ($F(9, 30) = 3,5 ; p = 0,004$). C'est ainsi que le test robuste de Welch a été utilisé au lieu de l'ANOVA classique. Et il n'y a pas eu de différences significatives entre les traitements pour le poids moyen des nodules par plant ($F(9, 12,1) = 0,64 ; p = 0,74$).

Tableau 5 : Nombre et poids moyens des nodules par plant pour chaque traitement

Traitement	Nombre de nodules par plant	Poids des nodules par plant (mg)
T ₂ (FOMI)	10,3 ± 8,1	30,1 ± 10,4
T ₄ (Grevillea)	7,0 ± 5,6	17,4 ± 12,5
T ₈ (Persea)	6,8 ± 8,1	22,6 ± 9,6
T ₉ (Albizia)	6,3 ± 7,3	20,2 ± 8,2
T ₃ (DAP)	4,6 ± 4,1	28,1 ± 6,9
T ₇ (Markhamia)	3,9 ± 6,7	19,4 ± 11,6
T ₆ (Maesopsis)	3,6 ± 4,7	22,9 ± 23,1
T ₁ (Fumier)	2,1 ± 1,9	23,5 ± 5,8
T ₀ (Témoin)	1,4 ± 1,9	49,8 ± 51,5
T ₅ (Ficus)	0,7 ± 0,7	12,8 ± 15,6

3-3-3. Rendement du soja

Le rendement du soja est présenté à travers un certain nombre de paramètres de production : le nombre de gousses par plant (NGP), le nombre de grains par gousse (NGG) et le poids de mille grains (PMG) (**Tableau 6**). Les traitements ont conduit à la formation des gousses par plant significativement différentes ($p < 0,0001$). Le nombre de gousses par plant va de 4,7 gousses pour le témoin à 14,2 gousses pour le traitement FOMI. Les deux traitements combinant la fumure organique et la fumure minérale viennent en tête, et sont suivis par le fumier d'étable. Les six litières suivent en bloc, tandis que le témoin vient en dernière position. Le test de la plus petite différence significative (PPDS ou LSD : Least Significant Difference) appliqué aux traitements a montré 4 groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. La comparaison par paires selon le test de Tukey HSD a montré des différences significatives en nombre de gousses par plant entre FOMI et les traitements Ficus ($p = 0,03$), Maesopsis ($p = 0,007$), Markhamia ($p = 0,004$), Albizia ($p = 0,004$), Grevillea ($p = 0,0007$), et le témoin ($p = 0,0002$). Il n'y a pas eu de différences significatives en nombre de gousses par plant entre les autres traitements. Pour ce qui est du nombre de grains par gousse, l'analyse de la variance n'a pas montré de différences significatives entre traitements ($p = 0,25$). Le nombre de grains par gousse va de 1,63 pour le témoin à 1,87 pour le traitement FOMI. Pour ce paramètre, la litière issue de *Markhamia lutea* s'est classée entre les traitements FOMI et DAP. Quant au le poids de mille grains, l'analyse de la variance n'a révélé aucune différence significative entre les traitements ($p = 0,06$). Le PMG obtenu va de 122 g pour le témoin à 148,4 g pour le traitement FOMI. Des différences significatives entre les traitements ont été observées pour le rendement en grains du soja ($p < 0,0001$). Les traitements combinant la fumure organique et minérale viennent en tête et constituent un groupe à part. FOMI vient en tête avec 1440,9 kg/ha. Il est suivi par le DAP avec 1207,2 kg/ha. Les litières testées sont regroupés en deux autres groupes qui se chevauchent. Le témoin (363,2 kg/ha) vient en dernier lieu et constitue un groupe à part. La comparaison par paires selon le test de Tukey HSD a montré que le rendement en grain du soja obtenu pour le traitement FOMI diffère significativement de ceux obtenus avec les traitements Persea ($p = 0,03$), Ficus ($p = 0,003$), Maesopsis ($p = 0,005$), Markhamia ($p = 0,002$), Albizia ($p = 0,003$), Grevillea ($p = 0,01$), et le témoin ($p = 0,0002$). Il y avait aussi des différences significatives entre le DAP et les traitements Markhamia ($p = 0,04$) et le témoin ($p = 0,004$). Il n'y avait pas de différences significatives entre les autres traitements comparés deux à deux.

Tableau 6 : Nombre de gousses par plant, nombre de grains par gousse, poids de mille grains, et rendement en grains de soja pour chaque traitement

Traitement	NGP	NGG	PMG (g)	Rendement en grains (kg/ha)
T ₂ (FOMI)	14,2 ± 2,7a	1,82 ± 0,05	148,4 ± 6,9	1440,9 ± 339,4a
T ₃ (DAP)	11,7 ± 1,9ab	1,89 ± 0,08	144,6 ± 10,1	1207,2 ± 277,7a
T ₁ (Fumier)	9,1 ± 4,3bc	1,76 ± 0,13	131,1 ± 7,1	789,0 ± 424,4b
T ₈ (Persea)	8,3 ± 2,2bcd	1,79 ± 0,17	132,0 ± 10,7	750,3 ± 277,4bc
T ₅ (Ficus)	8,0 ± 2,1cde	1,74 ± 0,10	143,7 ± 9,3	747,9 ± 209,8bc
T ₆ (Maesopsis)	6,9 ± 2,2cde	1,81 ± 0,11	130,6 ± 21,7	613,8 ± 238,8bc
T ₇ (Markhamia)	6,5 ± 2,3cde	1,85 ± 0,13	122,3 ± 18,3	549,9 ± 224,7bc
T ₉ (Albizia)	6,4 ± 1,6cde	1,79 ± 0,06	131,5 ± 11,2	579,2 ± 208,5bc
T ₄ (Grevillea)	5,2 ± 3,0de	1,73 ± 0,06	135,8 ± 8,5	475,7 ± 249,9bc
T ₀ (Témoin)	4,7 ± 1,8de	1,63 ± 0,22	122,0 ± 11,3	363,2 ± 167,5c

NGP : nombre de gousses par plant ; NGG : nombre de grains par gousse ; PMG : poids de mille grains.

En principe, le traitement qui donne à la fois le plus grand nombre de gousses, le plus grand nombre de grains et qui pèsent lourd devrait produire le meilleur rendement. Ainsi, pour des besoins de classification, nous proposons un modèle additif des scores (places au classement) obtenus par chaque traitement pour le rendement et ses composantes. Par exemple, le score de 1 qui est le plus bas pour un traitement signifie que ce dernier occupe la première position pour tous les paramètres. Dans ce contexte, le traitement qui montre le plus bas score est classé meilleur. Cette opération donne lieu au classement suivant (**Tableau 7**) : FOMI > DAP > Persea > Fumier > Ficus > Maesopsis > Albizia = Markhamia > Grevillea > Témoin.

Tableau 7 : Scores obtenus par les différents traitements pour le rendement et ses composantes

Traitement	NGP	NGG	PMG	Rendement en grains	Score moyen
T ₂ (FOMI)	1	3	1	1	1.5
T ₃ (DAP)	2	1	2	2	1.75
T ₈ (Persea)	4	6	5	4	4.75
T ₁ (Fumier)	3	7	7	3	5
T ₅ (Ficus)	5	8	3	5	5.25
T ₆ (Maesopsis)	6	4	8	6	6
T ₉ (Albizia)	8	5	6	7	6.5
T ₇ (Markhamia)	7	2	9	8	6.5
T ₄ (Grevillea)	9	9	4	9	7.75
T ₀ (Témoin)	10	10	10	10	10

NGP : nombre de gousses par plant ; NGG : nombre de grains par gousse ; PMG : poids de mille grains.

4. Discussion

Exception faite pour *Ficus thonningii*, toutes les autres litières utilisées présentent des valeurs de pH inférieures à 7. Ces valeurs sont inférieures aux normes pour les végétaux [14]. Elles pourraient donc avoir un potentiel acidifiant, ce qui résulterait en des effets négatifs après leur incorporation dans un sol qui est lui-même déjà acide. La valeur de pH la plus petite (5,22) a été obtenue pour *Grevillea robusta*. Toutes les litières montrent des teneurs normales en azote (N) sauf *G. robusta* selon [14]. Toutes les litières sont pauvres

en phosphore (P) et, exception faite de *F. thonningii*, en potassium (K). Toutefois, elles présentent toutes des teneurs normales en calcium (Ca). *G. robusta* est pauvre en magnésium (Mg) au moment où *F. thonningii* et *Maesopsis eminii* en sont riches. Par le biais des ratios entre éléments comme le rapport C/N, on conclut que *Persea americana* est aussi pauvre en azote avec un rapport C/N de 34,6 au-delà de la norme supérieure selon [14]. En termes d'absence d'éléments minéraux limitants dans les litières foliaires, *F. thonningii* est le premier. Il ne présente aucune autre limitation sauf pour le P qui est déficient dans toutes les litières. Quatre espèces (*P. americana*, *M. eminii*, *Markhamia lutea*, et *Albizia gummifera*) constituent un deuxième groupe avec trois éléments limitants (pH, K et P). Pour ce groupe, l'essence qui présente plus de K est considérée comme étant de meilleure qualité. *G. robusta* vient en dernier lieu avec quatre facteurs limitants (N, pH, K et P). On peut ainsi proposer le classement suivant pour ce qui est de la qualité chimique des litières : *Ficus thonningii* > *Albizia gummifera* > *Maesopsis eminii* > *Markhamia lutea* > *Persea americana* > *Grevillea robusta*. En conséquence, pour assurer de bonnes conditions de croissance des végétaux, il serait intéressant de combiner les litières avec une fertilisation minérale surtout pour le P et le K. Aussi, il faudrait commencer par le chaulage en vue de corriger l'acidité du sol et le potentiel effet acidifiant des litières. Ceci apporterait également du Ca et du Mg surtout en ce qui concerne *G. robusta* et *A. gummifera*. Toutefois, en cas de chaulage avec de la dolomie, comme c'est souvent le cas au Burundi, il faudrait tirer beaucoup d'attention avec la litière issue de *M. eminii* qui est riche en Mg pour ne pas déstabiliser les équilibres en cations. Les matières organiques peuvent contribuer à la modification des conditions locales du sol. En ce qui concerne la salinité, pour des valeurs de conductivité électrique (CE) comprises entre 2 et 4 dS/m à 25°C, seules les espèces de plantes très sensibles comme le citronnier (*Citrus limon* L.) ou le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) sont affectées [13]. De manière générale, il y a eu de faibles taux de germination du soja pour tous les traitements évalués. Le plus bas taux de germination (48 %) a été observé pour la litière de *F. thonningii*. Ceci pourrait être attribué à son niveau de salinité avec une CE proche de 4 dS/cm.

Cela avait été aussi reporté par [17, 18] dans leurs travaux traitant différents niveaux de salinité sur la germination du soja. Ces auteurs ont noté une diminution du taux de germination avec l'augmentation du niveau de salinité, où le plus bas taux de germination de 38 % était obtenu pour une CE de 4 dS/m. Le nombre maximum de nodules produits par le soja a été de 10,3 nodules par plant pour T₂ (FOMI). Il reste bas. Dans un essai sur le soja, [19] a obtenu en moyenne entre 31,8 à 44,3 nodules par plant. Le nombre réduit de nodules dans notre essai pourrait être attribué à la forte acidité du sol utilisé ainsi qu'à la tendance acidifiante des litières utilisées. Le nombre de nodules très faible pour *F. thonningii* pourrait être attribué à son niveau de salinité. En effet, la nodulation du soja est sérieusement affectée par les stress liés au sol, essentiellement l'acidité et la salinité [20]. Le témoin arrive en dernier lieu en produisant le plus bas nombre de nodules (1,4 nodules par plant) mais qui pèsent lourd. Ceci confirme les résultats de [21] où, sur un sol non fertilisé et n'ayant jamais reçu aucun précédent cultural de légumineuses, il a obtenu 2,7 nodules par plant, chacun pesant en moyenne 50 mg. D'après notre expérimentation, *F. thonningii* et *M. eminii* sont des espèces à fort potentiel fertilisant. Le rapport C/N qui caractérise le pouvoir de minéralisation de la matière organique montre que ces espèces sont les meilleures avec un rapport C/N faible par rapport aux autres espèces. Mais, il y a eu production d'un faible nombre de nodules pour ces espèces, ainsi que pour le DAP (moins de 5). Cela contraste avec les résultats obtenus au Bénin où un essai avec l'application de P a produit en moyenne 14 nodules par plant de soja [22]. La raison pourrait être les fortes teneurs en azote dans ces espèces. En effet, une étude sur la réponse des isolignes de soja à l'azote en conditions de sol modifiées a montré que le poids, le nombre ainsi que la taille des nodules étaient inversement liés à l'augmentation des quantités d'azote appliquées [23]. Dans leur étude, [24] ont montré que le nombre et le poids de nodules les plus élevés sont obtenus avec la fertilisation organique qui augmente la population microbienne (apport en C), entraînant ainsi une augmentation du nombre de nodules. Cette observation pourrait être à la base des bonnes performances de nodulation avec le traitement FOMI qui contient de la matière organique. En comparaison avec les litières

utilisées, cette matière organique de FOMI est potentiellement plus disponible pour les populations microbiennes. Il a été rapporté que, même si les organismes fixateurs d'azote (*Rhizobium*) peuvent certainement persister dans les sols, leur efficacité peut être améliorée par l'ajout de carbone, ce qui suggère qu'ils sont limités en C [25]. Quant aux composantes du rendement, le plus grand nombre de gousses, le poids de mille grains le plus élevé ainsi que le plus grand rendement par ha ont été obtenus pour le traitement FOMI. Il est suivi par le DAP. Le fumier d'étable, dans le même groupe avec les six litières testées, vient ensuite. *Grevillea robusta* constitue une exception et partage le même groupe avec le témoin. Ils sont les derniers de la liste. Nos résultats pour les traitements FOMI et DAP sont proches des résultats de l'ISABU au Burundi [26] ainsi que ceux observés en Côte d'Ivoire [27] et au Bénin [22]. Le classement basé sur le score moyen obtenu pour le rendement et ses composantes montre que l'efficacité agronomique des six espèces agroforestières associées au café suit l'ordre décroissant suivant : *Persea americana*, *Ficus thonningii*, *Maesopsis eminii*, *Albizia gummifera*, *Markhamia lutea* et *Grevillea robusta*. Cela correspond globalement aux teneurs en éléments nutritifs des espèces testées. *F. thonningii*, *P. americana* et *M. eminii* se caractérisent par des teneurs élevées pour la plupart des éléments nutritifs, tandis que *M. lutea* et *G. robusta* sont globalement pauvres en nutriments (N, P, Mg, K). *A. gummifera* se situe entre les deux groupes d'espèces. Il est certes riche en N (avec un faible rapport C/N) et en K, mais il est pauvre en Ca et Mg. L'effet non significatif de ces amendements organiques pourrait être lié à la courte durée de décomposition dans cette étude du fait que les réserves en éléments nutritifs (surtout l'azote) issues de la décomposition sont insuffisantes pour assurer une bonne croissance. Ceci est confirmé par les travaux [28] sur *Faidherbia albida* A. Chev., *Azadirachta indica* A. Juss., *Casuarina equisetifolia* Forsk., *Andropogon gayanus* Kunth., et *Eragrostis tremula* Steud *in situ*, qui ont montré qu'il fallait au moins sept mois pour que l'effet de la litière soit significatif. Une étude sur la décomposition des feuilles de *Cordia africana* et *Albizia gummifera* en Ethiopie a montré que l'azote était immobilisé pendant les 4 premières semaines dans la plupart des traitements [29]. Par conséquent, les espèces agroforestières à libération rapide de nutriments sont les meilleures.

5. Conclusion

Cette étude a montré que les litières d'espèces d'arbres agroforestiers associées au café sont des sources importantes de nutriments capables d'améliorer la fertilité des sols et la production de soja. *Ficus thonningii* est de meilleure qualité en termes de teneurs en éléments nutritifs. L'équilibre entre éléments révèle des teneurs moindres en K et P pour toutes les espèces. *Persea americana* et *F. thonningii* ont conduit à un rendement en grains élevé, juste après la combinaison de fertilisation organique et minérale, et après le fumier de ferme. Il en ressort de cette recherche que les deux espèces (*Persea americana* et *F. thonningii*) doivent être promues pour la pratique de l'ombrage du café. *F. thonningii* est une espèce indigène qui se multiplie facilement par voie végétative et présente d'autres avantages : usage culturel, alimentation animale et production élevée de biomasse, tandis que *P. americana* est un arbre fruitier qui peut également contribuer à la sécurité alimentaire et au revenu des ménages. Cette étude devrait être répétée dans le temps pour évaluer l'effet résiduel de ces litières, mais aussi pour d'autres types de cultures, d'environnements et de sols.

Remerciements

Nous remercions la région de Baden-Württemberg en Allemagne pour le financement de cette étude, sous le numéro SEZ 2021-09/EZ 20 23.

Références

- [1] - J. N. WINTGENS, "Coffee : Growing, Processing, Sustainable Production. A Guidebook for Growers, Processors, Traders and Researchers", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2004)
- [2] - A. HATUNGIMANA, *Les cahiers d'Outre-Mer*, 243 (2008)
- [3] - B. B. LIN, *Agric For Meteorol*, 150 (4) (2010) 510 - 518
- [4] - S. GAGLIARDI, J. AVELINO, L. B. BEILHE and M. E. ISAAC, *Crop Prot.*, 130 (2020)
- [5] - J. BEER, *Agrofor. Syst.*, 5 (1987) 3 - 13
- [6] - R. G. MUSCHLER, *Agrofor. Syst.*, 85 (2001) 131 - 139
- [7] - C. A. PALM, C. N. GACHENGO, R. J. DELVE, G. CADISCH and K. E. GILLER, *Agric Ecosyst Environ*, 83 (1) (2001) 27 - 42
- [8] - S. KABONEKA, C. KWIZERA, S. NIJIMBERE, W. IRAKOZE, P. NSENGIYUMVA, S. NDIHOKUBWAYO and B. HABONIMANA, *Int. j. adv. sci. res. eng.*, 7 (4) (2021) 1 - 15
- [9] - S. NDIHOKUBWAYO, T. HAVYARIMANA, S. WINDBÜHLER, S. NIRAGIRA, B. HABONIMANA, S. KABONEKA and H E. MEGERLE, *East African Journal of Forestry and Agroforestry*, 3 (1) (2021) 40 - 53
- [10] - FAOSTAT, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, (Septembre 2022)
- [11] - H. M. O. OTIENO, G. N. CHEMINING'WA and S. J. ZINGORE, *Agric. Sci.*, 10 (4) (2018) 199 - 208
- [12] - B. B. MEKKI and A. G. AHMED, *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 1 (4) (2005) 320 - 324
- [13] - D. J. VOGT, J. P. TILLEY and R. L. EDMONDS, "Soil and Plant Analysis for Forest Ecosystem Characterization", Higher Education Press and Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, (2015)
- [14] - M. R. MOTSARA and R. N. ROY, "Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis", FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 19, Rome, (2008)
- [15] - R. UCHIDA, in "Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture", University of Hawaii, Manoa, (2000)
- [16] - E. TESSENS and J. GOURDIN, "Critères d'interprétation des analyses pédologiques", Fiche de labo n°19, Institut des Sciences Agronomiques du Burundi, Bujumbura, (1993) 36 p.
- [17] - S. F. AHMADVAND, B. SAADATIAN and M. POUYA, *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 12 (6) (2012) 769 - 774
- [18] - T. A. ESSA, *J Agron Crop Sci*, 188 (2002) 86 - 93
- [19] - B. D. CIGELSKE, H. KANDEL and T. M. DESUTTER, *Agricultural Sciences*, 11 (6) (2020)
- [20] - M. MIRANSARI and D. L. SMITH, *J Plant Nutr.*, 30 (12) (2007) 1967 - 1992
- [21] - M. HALWANI, M. RECKLING, D. EGAMBERDIEVA, R. A. OMARI, R. S. D. BELLINGRATH-KIMURA, J. BACHINGER and R. BLOCH, *Front. Plant Sci.*, 12 (2021) 1 - 9
- [22] - C. C. ZOUNDJI, P. HOUNGNANDAN, M. H. AMIDOU, F. A. KOUELO and F. TOUKOUROU, *JAPS, Journal of Animal and Plant Sciences*, 25(5) (2015) 1384 - 1392
- [23] - C. R. WEBER, *Agron J.*, 58 (1) (1966) 46 - 49
- [24] - Y. F. KOUASSI, G. A. GBOGOURI, K. A. N'GUESSAN, A., BILGO, K. T. P. ANGUI and J. AMA, *Agronomie Africaine*, 31 (2019) 21 - 32
- [25] - K. MOHAMMADI, Y. SOHRABI, G. HEIDARI, S. KHALESRO and M. MAJIDI, *Afr. J. Agric. Res.*, 7 (2012) 1782 - 1788
- [26] - ISABU *Rapport de la journée de la recherche agronomique*. Bujumbura, Burundi, (1990)
- [27] - J. WEY and S. IBRAHIMA, Cultures de diversification. Etude de faisabilité du soja et du tournesol dans la zone cotonnière du Nord Cameroun : Synthèse des résultats de la campagne expérimentale 2006 (Cameroun), Monographie, CIRAD, Montpellier, (2007)
- [28] - M. D. DIALLO, A. GUISSSE, A. BADIANE-NIANE, S. SALL and J. L. CHOTTE, *Arid Land Res. Manag.*, 19 (2) (2005) 173 - 181
- [29] - T. TEKLAY and A. MALMER, *Soil Biol. Biochem.*, 36 (2004) 777 - 786