



Faisabilité de la production du coton biologique au Cameroun : essai de fertilisation organique

Yakouba Oumarou*, Desiré Kesseo Todou Magouedek, Felix Alain Wassouo, Jackson Djakbe Dapsia, Alidou Mohamadou

Université de Maroua. Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua. BP 46 Maroua (Cameroun). E-mail : yakoubaoumarou@yahoo.fr

Reçu le 15 septembre 2024, accepté le 22 novembre 2024, publié en ligne le 28 décembre 2024

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v7i4.6>

RESUME

Description du sujet. Au Cameroun, le coton est produit selon un système de culture conventionnel, caractérisé par l'apport systématique d'intrants chimiques. Avec la prise de conscience croissante des risques que ces produits peuvent générer pour l'environnement, des arguments sont de plus en plus avancés en faveur d'une production biologique du coton.

Objectifs. L'objectif de cette étude est d'identifier les fertilisants organiques utilisables dans le système de culture biologique du coton.

Méthodes. L'étude a été conduite dans deux localités de la zone cotonnière du Cameroun. Le dispositif expérimental était en blocs de Fisher avec cinq (5) traitements (Compost ; Tourteau de neem ; Terre de parc à bétail ; NPK 20-10-10 + Urée à 46 % de N et le Témoin sans fertilisation). L'essai a été répété trois fois. Les paramètres de croissance (diamètre au collet, taille de la plante et nombre de branches fructifères) et de rendement (nombre moyen de capsules par plante et rendement en coton-graine) ainsi que les caractéristiques physico-chimiques du sol ont été mesurés.

Résultats. Les résultats obtenus ont montré que sur les deux sites, le pH du sol qui était modérément acide a évolué vers la neutralité. Les taux du carbone organique, de la matière organique, la teneur en azote, en magnésium, en potassium et la somme des bases échangeables ont été aussi améliorées. Par ailleurs, les fertilisants organiques utilisés ont significativement et positivement influencé les paramètres de croissance mesurés et les paramètres de rendement sur les deux sites. Parmi ces fertilisants, c'est le tourteau de Neem qui a induit les meilleurs résultats avec des rendements de 1355,57 kg/ha contre 712,68 kg/ha sur la parcelle témoin à Zokok-Ladéo et 3377,10 kg/ha contre 1955,56 kg/ha sur la parcelle témoin à Dolla.

Conclusion. Ces résultats suggèrent que ces fertilisants organiques et plus particulièrement le Tourteau de Neem peuvent être utilisés dans le système de culture biologique du coton au Cameroun.

Mots-clés : *Gossypium hirsutum*, Agriculture Biologique, fertilisants organiques, rendement.

ABSTRACT

Feasibility of organic cotton production in Cameroon: organic fertilization trial

Description of the subject. In Cameroon, cotton is produced using a conventional crop production system, characterized by the systematic use of chemical fertilizers and insecticide treatments. With the growing awareness of the risks that these products can generate for the environment, and even for human health, arguments are increasingly being put forward in favor of an organic method of producing crops, particularly cotton.

Objective. The objective of this study is to identify organic fertilizers that can be used in the organic cotton growing system.

Methods. The study was conducted in two localities in the cotton-growing area of Cameroon (Zokok-Ladéo and Dolla). The experimental design was a Fisher block with 5 treatments: Compost; Neem cake; Livestock Park Soil; NPK 20-10-10 + Urea at 46% N and the Control without fertilization. The test was repeated 3 times. The growth and yield parameters as well as the physicochemical characteristics of the soil were measured.

Results. The results obtained showed that on both sites, the pH of the soil which was moderately acidic evolved towards neutrality. The rates of organic carbon, organic matter, nitrogen content, magnesium, potassium and the sum of exchangeable bases were also improved. In addition, the organic fertilizers used significantly and positively influenced the measured growth parameters (diameter at the collar, plant size and number of fruiting branches) and the yield parameters (average number of capsules per plant and cotton grain yield) on both sites. Among these fertilizers, Neem cake induced the best results with yields of 1355.57 kg/ha against 712.68 kg/ha on the control plot in Dolla and 3377.10 kg/ha against 1955.56 kg/ha on the control plot in Zokok-Ladéo.

Conclusion. These results suggest that these organic fertilizers and more particularly Neem cake can be used in the organic cotton farming system in Cameroon.

Keywords: *Gossypium hirsutum*, Organic Agriculture, organic fertilizers, yield.

1. INTRODUCTION

L'introduction de la culture du coton depuis 1950 au Nord-Cameroun a été le principal facteur de transformation de l'agriculture (Devèze, 2006). Depuis les années 1970, le coton a été un moteur dans la transformation des systèmes de production agricole et un élément structurant des économies locales (Soumaré *et al.*, 2020). Leader de la production de coton-graine dans l'espace CEMAC (Communauté Economique et Monétaire de l'Afrique Centrale), le Cameroun se positionne en 4^{ème} place des pays producteurs de coton-graine en Afrique (FAOSTAT, 2020), avec une production de près de 370 000 tonnes au cours de la campagne agricole 2021-2022 ; (MINEPAT, 2022).

Le coton au Cameroun est produit selon le système de culture conventionnel avec l'apport systématique d'engrais chimiques et de traitements insecticides (Folefack, 2011). La nutrition minérale du cotonnier, notamment en azote, en phosphore et en potassium et l'utilisation des pesticides contre les ravageurs constituent des facteurs déterminants de la production (Koulibaly *et al.*, 2010). Aujourd'hui, l'utilisation systématique de ces intrants est remise en question, avec la prise de conscience croissante des risques qu'ils peuvent générer pour l'environnement, voire pour la santé humaine (Aubertot *et al.*, 2005). L'utilisation des engrais minéraux, devenus la principale voie d'amendement des sols a contribué à l'acidification des sols, à la baisse du taux de la matière organique et de la capacité d'échange cationique des sols (Njomaha, 2003 ; Yoni *et al.*, 2005). Face à ces défis, des voix s'élèvent de plus en plus en faveur d'un mode de production biologique (Bayiha, 2020).

L'Agriculture biologique en Afrique suscite de plus en plus d'intérêts du fait des nombreux bénéfices économiques, environnementaux, sanitaires et nutritionnels qu'elle apporte (Zeynab *et al.*, 2017). Au Cameroun, l'Agriculture biologique sous sa forme certifiée est arrivée dans les années 1990. Elle représentait en 2017 une superficie de 1089

hectares pour 499 producteurs. Il existe aujourd'hui une demande de plus en plus forte pour les produits issus de l'Agriculture biologique (Bayiha, 2020).

Le mode de production biologique interdit strictement l'utilisation d'engrais et pesticides chimiques, de même que l'utilisation des semences génétiquement modifiées. L'un des principes essentiels de ce système de production est la gestion naturelle de la fertilité des sols et de la nutrition des cultures par l'apport de fumure organique, la rotation des cultures, les cultures interlignes, les aménagements anti-érosifs et la conservation des eaux du sol. Un deuxième principe est la gestion naturelle des ravageurs et maladies, qui se base essentiellement sur une prévention systématique, la lutte biologique contre des ravageurs et la surveillance permanente des cultures (Abdoulaye *et al.*, 2008).

En ce qui concerne le coton biologique, le nouveau rapport sur le marché du coton biologique 2021 de « Textile Exchange » montre que 2019-2020 a été une année record, avec le plus grand volume de fibres de coton biologique récolté à ce jour dans le monde. Au total, 229 280 agriculteurs ont récolté 249 153 tonnes de fibres de coton biologique sur 588 425 hectares de terres certifiées biologiques dans 21 pays. (Textile Exchange, 2021). La hausse de la production du coton biologique est surtout motivée par l'augmentation de la demande, en particulier en Europe. Les travaux de Estur et Knappe (2007) ont montrés que la production du coton biologique et les échanges commerciaux ont augmenté de 70 % par an en moyenne entre 2001 et 2006, et ils ont plus que doublé chaque année depuis 2004.

En tant que pays producteur de coton conventionnel, le Cameroun a un fort potentiel pour produire le coton biologique. L'étude de faisabilité réalisé à cet effet par le projet ProCOTON de la GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*) a donné des résultats satisfaisants (GIZ, 2021). La présente étude ambitieuse

d'identifier des fertilisants organiques utilisables dans les systèmes de culture biologique, notamment le coton biologique. Les résultats obtenus peuvent contribuer à la promotion de l'agriculture biologique au Cameroun, réduire les conséquences négatives des engrais chimiques sur l'environnement et favoriser une agriculture durable.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Sites de l'étude

Les expérimentations ont été menées de juin à novembre 2022 dans deux localités de la zone cotonnière du Cameroun. Il s'agit de la localité de Zokok-Ladéo, située dans l'arrondissement de Maroua 1^{er}, département du Diamaré, région administrative de l'Extrême-Nord. Ses coordonnées géographiques sont : 10,5847° Nord de Latitude et 14,2623° Est de Longitude. La deuxième localité est celle de Dolla qui appartient à l'arrondissement de Pitoa dans le département de la Bénoué, région administrative du Nord Cameroun. Ses coordonnées géographiques sont : 9,2458° Nord de Latitude et 13,3145° Est de Longitude.

2.2. Matériel

Matériel végétal

La variété du coton utilisée est la variété IRMA Q302. Elle a été fournie par l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD). C'est une variété vulgarisée en milieu paysan dans la zone

cotonnière du Cameroun. Cette variété est à la fois très productive et donne des fibres de très bonne qualité, longues, bien blanches et à forte ténacité (Pallaï *et al.*, 2014).

Fertilisants organiques

Trois types de fertilisants organiques ont été comparés dans cet essai, il s'agit : (i) du compost à base des déjections bovines produit par la technique de compostage en tas réalisé par une Start-up mise en place par un groupe d'étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Maroua (la start-up 2BIO) ; (ii) de la terre de parc à bétail, prélevée au début de la campagne dans un parc à bétail ; (iii) du tourteau des amandes de neem (*Azadirachta indica*), obtenu auprès des coopératives productrices des produits forestiers non ligneux, encadrées par le Projet « Forêt-Environnement » (Pro-FE) de la GIZ.

A côté de ces fertilisants organiques, le NPK 20-10-10 + urée à 46% d'azote a été utilisé comme témoin positif.

Analyse chimique des fertilisants organiques utilisés

Afin de connaître la composition chimique des fertilisants organiques utilisés, une analyse chimique a été réalisée par un laboratoire d'analyse chimique de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-industrielles (ENSAI) de l'Université de Ngaoundéré au Cameroun. Le tableau 1 indique la composition biochimique de ces fertilisants organiques.

Tableau 1. Composition biochimique des fumures organiques utilisées

Echantillons	K total (%)	P total (%)	C.O (%)	M.O (%)	N total (%)	C/N
COMPOST	0,379	0,50	15,80	27,24	1,00	15,80
TDN	0,377	0,081	54,44	93,87	1,09	54,44
TPB	0,341	0,36	8,63	26,65	0,90	9,55

M.O : Matière organique ; N : Azote ; C : Carbone ; P : Phosphore ; K : Potassium ; TDN : Tourteau de Neem ; TPB : Terre de parc à bétail

2.3. Méthodes

Dispositif expérimental

Sur les deux sites, le dispositif expérimental était les blocs de Fisher avec cinq traitements : le témoin sans fertilisation, les 3 engrais organiques (Compost ; Tourteau de neem et Terre de parc à bétail) utilisés à la dose de 5 tonnes/ha et le NPK 20-10-10 (utilisé à la dose de 200 kg/ha) + l'Urée à 46 % (utilisée à la dose de 100 kg/ha) selon les recommandations de la société cotonnière du Cameroun. L'essai a été répété trois fois.

Tableau 2. Traitements comparés et leurs doses à l'hectare

Traitement	Fertilisants	Doses/ha
T1	Témoin	0
T2	NPK+Urée	200 kg de NPK + 100 kg d'urée à 46% de N

T3	Compost	5 Tonnes
T4	Tourteau de neem	5 Tonnes
T5	Terre de parc a bétail	5 Tonnes

Mise en place et conduite de l'essai

Préparation de terrain

Sur les deux sites, les parcelles ont été débarrassées des arbustes présents et labourées à l'aide d'une charrue à la profondeur de 25 cm. Il s'en est suivi un nivellement qui a permis de préparer le lit de semence.

Semis des parcelles

Le semis a été réalisé manuellement avec la variété IRMA Q302. Quatre à cinq graines ont été semées par poquet. Chaque parcelle élémentaire était constituée de six lignes d'une longueur de 10 m. Les écartements entre lignes de semis étaient de 80 cm et 40 cm entre les poquets, soit 48 m² par parcelle élémentaire. A la levée, les poquets ont été démarqués et deux plants ont été laissés par poquet. Les répétition (blocs) étaient séparées d'une distance de 2 m et les parcelles élémentaires au sein d'un même bloc étaient distantes de 1,5 m. Les parcelles ont été entourées des diguettes pour empêcher la contamination d'une parcelle à l'autre par les eaux de pluie.

Apport des fertilisants organiques

Les différentes fumures organiques ont été apportées selon les doses retenues, deux semaines après la levée. Ces doses sont les recommandations de la fertilisation organique en zone cotonnière au Cameroun (5 à 10 tonnes par hectare). L'application s'est faite sur chaque parcelle élémentaire de façon homogène et enfouis immédiatement par un binage.

Entretien des parcelles

Les parcelles ont été régulièrement débarrassées des mauvaises herbes par sarclage manuel. Un traitement phytosanitaire de couverture a été assuré contre les nuisibles dès l'apparition des boutons floraux et ceci jusqu'à la phase de maturation des capsules à l'aide de l'huile de Neem (un biopesticide) toutes les deux semaines à la dose d'un litre par hectare.

Mesure des paramètres

Un mois après l'application des différentes fumures, des mesures et comptages hebdomadaires ont été réalisés sur les paramètres définis suivants sur les quatre lignes centrales : (i) Diamètre au collet (il a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse

électronique) ; (ii) Taille des plants (mesuré à l'aide d'une règle graduée) ; (iii) Nombre de branches fructifères (déterminé par comptage manuel) ; (iv) Nombre de fruits par plant (déterminé par comptage manuel) ; (v) Poids de coton (mesuré à la récolte à l'aide d'une balance électronique de précision).

Prélèvement et analyse du sol

Les échantillons de sol ont été prélevés suivant la méthode de diagonales sur l'ensemble des parcelles élémentaires et sur les deux sites. Les prélèvements ont été effectués à deux périodes différentes : avant l'application des fumures et à la récolte. Pour chaque période dans chacune des parcelles élémentaires et sur chaque site, un échantillon composite de la couche de 0-20 cm du sol a été constitué à partir de quatre échantillons élémentaires. Les échantillons séchés à l'air ont été tamisés à 2 mm et ensachés pour les analyses. Des analyses de laboratoire de routine (Pauwels *et al.*, 1992) ont été faites sur la fraction fine des échantillons. Les paramètres suivants ont été analysés ou déterminés sur ces échantillons : la granulométrie, le pHeau, le pHKCL, le carbone organique total du sol, l'Azote total du sol, le pourcentage de matière organique, les bases échangeables et le phosphore disponible.

Détermination du pH

La mesure du pH a été réalisée selon la norme internationale ISO 10390 (1994). La méthode consiste à préparer une suspension de sol/eau. Dans un bécher, 10 g de sol fin ont été mélangés à 25 ml d'eau distillée et la mesure de l'acidité réelle (pH-H₂O) a été effectuée après 16 heures d'homogénéisation à température ambiante à l'aide d'un pH-mètre de marque CG822. L'acidité potentielle (pH-KCl) a été déterminée après 10 minutes d'homogénéisation sur une suspension sol-KCl selon un rapport sol/solvant de 1/2,5.

Matière organique et le carbone

Le dosage de la matière organique a été réalisé par la méthode de Walkley et Black (1934) telle que décrite par Pauwels *et al.* (1992). Cette méthode est basée sur l'oxydation du Carbone Organique par le Dichromate de Potassium (1N) en milieu fortement acide (H₂SO₄). Le titrage de retour de l'excès de K₂Cr₂O₇ par le Sulfate ferreux (FeSO₄.7H₂O) permet de calculer la quantité de dichromate qui a été neutralisée par le Carbone Organique. Le point

d'équivalence est indiqué par le virage de la diphenylamine [(C₆H₅)₂NH₃] du violet au vert. Le pourcentage de Carbone Organique (CO) a été calculé par la formule suivante :

% CO = $4(V_0 - V) \times 100 / V_0 \cdot Pe$; Avec:

V₀ = Volume de FeSO₄.7H₂O ajouté au témoin ;

V = Volume de FeSO₄.7H₂O ajouté à l'échantillon ;

Pe = prise d'essais (0,5 g de sol).

La teneur en matière organique (MO) est : % MO = % CO × 1,724. Le coefficient 1,72 correspond à la proportion moyenne de carbone dans la matière organique du sol (cette proportion est de 58 %).

Azote total

La détermination de l'azote total a été faite par la méthode de Kjeldahl citée par Pauwels *et al.* (1992). Elle consiste en la minéralisation complète de l'azote organique par traitement à chaud avec un mélange d'acide sulfurique concentré et d'acide salicylique en présence du catalyseur (sélénium+CuSO₄) à 300 °C pendant 30 minutes. La minéralisation est suivie par l'alcalinisation de l'extrait minéralisé avec du NaOH de concentration 300 g/l. Une distillation par entraînement à la vapeur de l'azote sous forme de NH₃ ; après le distillat est capté dans l'acide borique (H₃BO₃) et ensuite titré avec l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique dilué (0,01N). La teneur en Azote total a été calculée par la formule suivante :

N (g/kg de terre) = $14(V - V_0) t / Pe$; Avec :

V = volume de H₂SO₄ ajouté à l'échantillon ;

V₀ = volume de H₂SO₄ ajouté au témoin ;

Pe = prise d'essais de sol en grammes (2 g) ;

t = normalité de H₂SO₄ = 0,01N

N (%) = N (g/kg de terre) * 0.1

Détermination des bases échangeables et capacité d'échange cationique

La détermination des bases échangeables dans le sol a été faite suivant la méthode de Metson (Pauwels *et al.*, 1992) pour les sols dont le pH est inférieur à 7 et l'extraction a été faite à l'acétate d'ammonium à pH 7.

Extraction des bases échangeables à l'acétate d'ammonium

Le sol saturé à l'acétate d'ammonium à pH 7, les ions ammonium se déplacent et remplacent les cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺) dans les colloïdes de sol. Le Ca et le Mg dans l'extrait ont été dosés par complexométrie avec l'EDTA. Le Mg a été déterminé par une différence de résultats de dosages de (Ca²⁺+Mg²⁺) et du Ca. Le Na et le K dans l'extrait ont été dosés par spectrophotométrie à flamme suivant la méthode décrite par Pauwels *et al.* (1992).

Pour la détermination de la CEC

Chaque de sol saturé à l'acétate a été lavé à l'alcool 95 % pour éliminer les NH₄⁺ en excès qui ont saturé le complexe d'échange. Ceci a été vérifié par l'utilisation du réactif de Nestler ; Cinquante millilitres de KCl (1 N) ont été introduits dans chaque tube contenant l'échantillon de sol qui a été saturé à l'acétate d'ammonium, le potassium remplace les ions ammonium qui ont saturé le complexe d'échange. L'extrait de solution percolé au KCl est ensuite distillé en ajoutant du NaOH et 2-3 gouttes de phénolphtaléine et dosé à l'acide sulfurique (0,01N) et la CEC7 est obtenue en utilisant la formule suivante : CEC = (V - V₀) * 1,6 Avec : V et V₀ respectivement les volumes de l'acide sulfurique ajouté dans l'échantillon.

Analyse granulométrique par la méthode de la pipette de Robinson-Köhn

Les différentes fractions granulométriques ont été déterminées par une analyse mécanique. A cet effet, 50 ml d'eau oxygénée (20 %) ont été ajoutés à 10 g de sol dans un bécher de 500 ml pour détruire la matière organique. Le mélange (sol + eau oxygénée) a été laissé réagir à la température ambiante pendant 12 heures et le processus de cette destruction a été accéléré par chauffage doux sur une plaque chauffante jusqu'à la cessation de l'effervescence. Après refroidissement, un volume de 500 ml a été ajouté à la suspension après homogénéisation. Le sable a été séparé des autres fractions par tamisage sous eau à l'aide d'un tamis de 50 µm. Les prélèvements de limon et d'argile étaient faits au moyen d'une pipette de Robinson-Köhn, après dispersion avec l'héxamétaphosphate de sodium (4 %). Le temps et la profondeur de sédimentation sont déterminés selon la loi de Stokes. Les classes texturales ont été déterminées par l'usage du Triangle textural (USDA).

Analyse des données

L'ensemble des données brutes a été saisi et mis en forme avec le tableur Microsoft office Excel 2016, et importé sous forme de fichiers textes (séparateur : tabulation) dans le logiciel R version 4.0.3 pour les analyses statistiques. Les effets des traitements comparés ont été testés à l'aide d'une analyse de variance au seuil de 5 %. Lorsqu'une différence significative est notée entre les traitements comparés, le test de Tukey a permis de faire des comparaisons deux à deux.

3. RESULTATS

3.1. Caractéristiques physico-chimiques du sol avant la mise en place des traitements

Le Tableau 3 présente les caractéristiques physico-chimiques du sol des parcelles expérimentales avant la mise en place de l'essai à Zokok-ladéo et à Dolla.

Tableau 3. Caractéristiques du sol avant la mise en place de l'essai

Paramètre	Zokok	Dolla
A%	34,00	36,00
L%	38,50	23,00
S%	27,50	41,00
pHeau	6,00	5,80
CO (%)	2,43	2,20
MO (%)	4,20	3,80
N (%)	0,02	0,03
C/N	121,5	73,33
Ca (méq/100 g)	4,32	5,92
Mg (méq/100 g)	1,44	1,68
K (méq/100 g)	0,48	0,48
Na (méq/100 g)	0,23	0,23
SBE (méq/100 g)	6,47	8,31

CEC (méq/100 g)	21,00	24,00
P (mg/kg)	23,98	5,43

Le sol du site expérimental à Zokok-ladéo a une texture limono-argileuse par contre celui de Dolla est sablo-argileuse. Ces sols sont peu acides sur les deux sites (pH de 6 à Zokok-ladéo et 5,8 à Dolla). Les taux de matière organique respectivement de 4,2 % et 3,8 % à Zokok-ladéo et Dolla montre que ces sols sont riches en matières organiques. Cependant, les valeurs de C/N très élevé sur les deux sites (supérieure à 10) suggèrent que la matière organique évolue de façon très lente dans ces sols, c'est-à-dire qu'elle se transforme et se minéralise peu. La faible teneur en azote est une conséquence de la faible minéralisation de la matière organique dans ces sols vu que le rapport C/N est largement supérieur à 10. Avec la haute teneur en matière organique, on note une bonne capacité d'échange cationique. Néanmoins, les teneurs en bases échangeables (calcium, magnésium, sodium, potassium) sont faibles. En revanche, le phosphore semble être meilleur à Zokok-ladéo comparativement à Dolla à cause de la texture et de la nature de la roche mère qui semble être différentes.

3.2. Caractéristiques chimiques des sols à la récolte sur les deux sites

Les tableaux 4 présente les résultats de l'analyse des échantillons des sols prélevés à la récolte.

Tableau 4. Caractéristiques chimiques des sols sur les deux sites à la récolte

Paramètres	Témoin		Compost		NPK+urée		Tourteau Neem		de Terre de parc à bétail	
	Zokok	Dolla	Zokok	Dolla	Zokok	Dolla	Zokok	Dolla	Zokok	Dolla
pHeau	6,50	6,20	6,50	5,90	6,20	6,00	6,00	5,80	6,40	5,80
CO (%)	2,05	1,35	2,59	1,97	2,82	1,51	3,13	2,05	2,13	2,43
MO (%)	3,53	2,33	4,46	3,40	4,86	2,60	5,40	3,53	3,66	4,20
N (%)	0,05	0,04	0,07	0,05	0,04	0,04	0,09	0,04	0,08	0,04
C/N	41,00	33,75	37,00	39,4	70,5	37,75	34,77	51,25	26,62	60,75
Ca (méq/100 g)	6,88	4,32	7,44	4,08	6,64	1,68	4,28	4,40	6,48	4,24
Mg (méq/100 g)	0,48	0,40	1,04	2,48	1,84	3,28	1,60	0,32	1,76	0,64
K (méq/100 g)	0,55	0,72	0,64	1,12	0,55	0,72	0,55	0,91	0,64	1,01
Na (méq/100g)	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
SBE (méq/100g)	8,14	5,67	9,35	7,91	9,26	5,91	6,66	5,86	9,11	6,12
CEC (méq/100g)	20,00	24,00	22,00	21,00	22,00	21,00	21,00	22,00	24,00	23,00
P (mg/kg)	26,73	4,47	50,55	7,94	32,36	3,87	7,82	23,62	24,34	12,37

Ces résultats montrent globalement que le pH qui été modérément acide a évolué vers la neutralité sur les deux sites. Par rapport au témoin non fertilisé et aux caractéristiques du sol avant la mise en place des fertilisants, les taux du carbone organique et de la matière organique ont été améliorés sur l'ensemble des parcelles amendées,

améliorants ainsi la teneur en azote du sol sur les deux sites. Quoique toujours largement supérieur à 10, les amendements organiques ont contribué à baisser le rapport C/N.

Les teneurs du sol en magnésium, en potassium et la somme des bases échangeables ont été aussi améliorées sur les parcelles amendées sur les deux sites. En ce qui concerne le phosphore, sa teneur a été améliorée sur les parcelles ayant reçu le NPK+ urée à Zokok-ladéo et sur les parcelles ayant reçu le tourteau de Neem et la terre de parc à bétail à Dolla. Cependant, sa teneur a été améliorée sur les parcelles ayant reçu le compost sur les deux sites.

3.3. Effets des fertilisants sur le diamètre au collet de la plante

La figure 1 présente l'effet des fertilisants testés sur le diamètre au collet du coton à Zokok-Ladéo et à Dolla. Les fertilisants organiques appliqués ont influencé significativement sur le diamètre au collet des plants sur les deux sites (ANOVA au seuil de 5 % avec ; $P = 0,0000462$ pour Zokok-ladéo et $P < 2e^{-16}$ pour Dolla). Sur les deux sites, le tourteau de Neem a induit les plus grands diamètres au collet ($21,16 \pm 4,18$ mm à Zokok-ladéo et $17,01 \pm 3,56$ mm à Dolla). Les parcelles témoins présentent les plants avec les faibles diamètres au collet sur les deux sites. Quel que soit le fertilisant, le site de Zokok-ladéo, y compris la parcelle témoin, présente les plants avec les plus grands diamètres au collet.

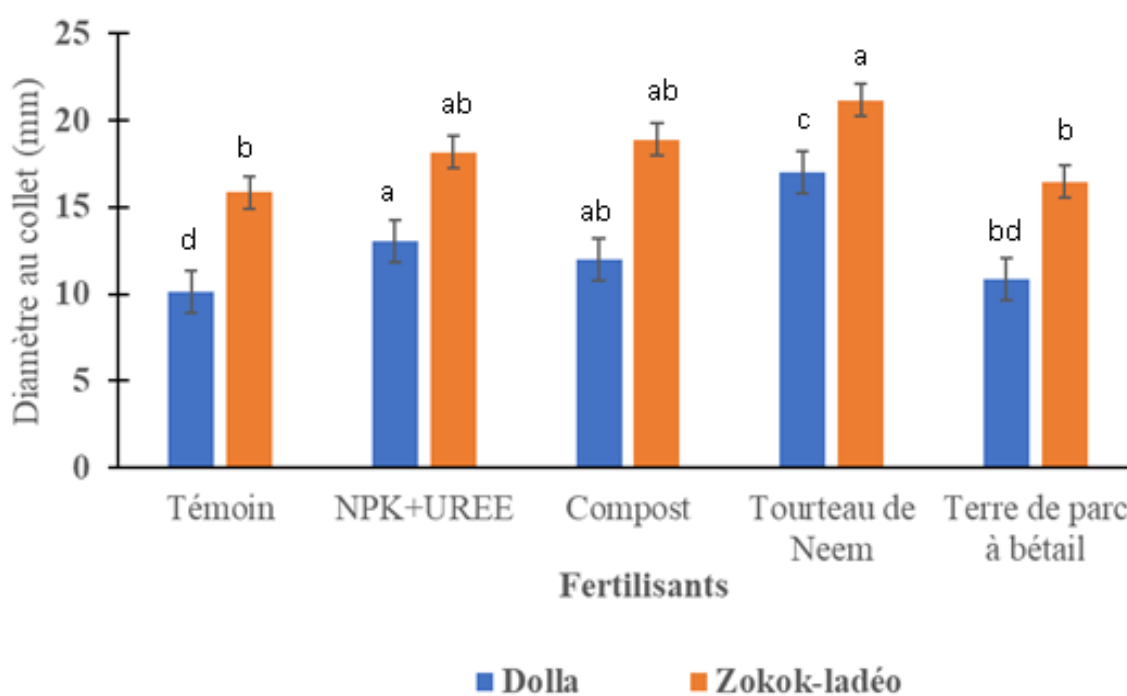


Figure 1. Effets comparés des fertilisants sur le diamètre au collet (pour un site donné, les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (ANOVA))

3.4. Effets comparés des fertilisants sur la hauteur des plantes à la récolte

La hauteur de la tige principale a varié significativement en fonction des fertilisants organiques appliqués sur les deux sites (ANOVA au seuil de 5 % ; $P = 1,26e^{-13}$ pour Zokok-ladéo et $P < 2e^{-16}$ pour Dolla). Sur les deux sites, ce sont les parcelles ayant reçu le Tourteau de Neem qui présentent les hauteurs les plus élevées des plantes à la récolte ($1,78 \pm 0,19$ m à Zokok-ladéo et $1,31 \pm 0,20$ m à Dolla). Quel que soit le fertilisant, le site de Zokok-ladéo, y compris pour les parcelles témoin, présente les plantes les plus hautes (Figure 2).

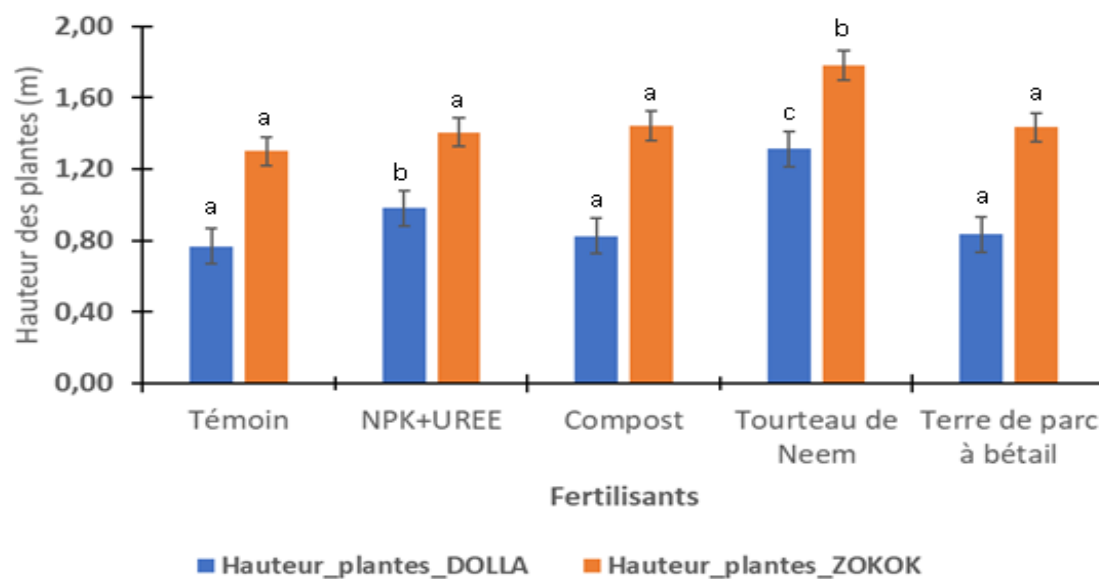


Figure 2. Effets comparés des fertilisants sur la hauteur des plantes (pour un site donné, les moyennes suivis de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (ANOVA))

3.5. Effets comparés des fertilisants sur le nombre des branches fructifères

La Figure 3 présente le nombre moyen de branches fructifères par plante sous l'effet des fertilisants testés sur les deux sites.

Le nombre de branches fructifères a varié significativement en fonction des fumures mises en test sur les deux sites (ANOVA au seuil de 5 % ; $P = 0,000827$ pour Zokok-ladéo et $P = 0,000135$ pour Dolla). Comme c'est le cas pour les paramètres précédents, c'est le Tourteau de Neem qui a favorisé le grand nombre de branches fructifères sur les deux sites (en moyenne $20,20 \pm 4,96$ branches fructifères à Zokok-ladéo et $14,96 \pm 3,96$ branches fructifères à Dolla).

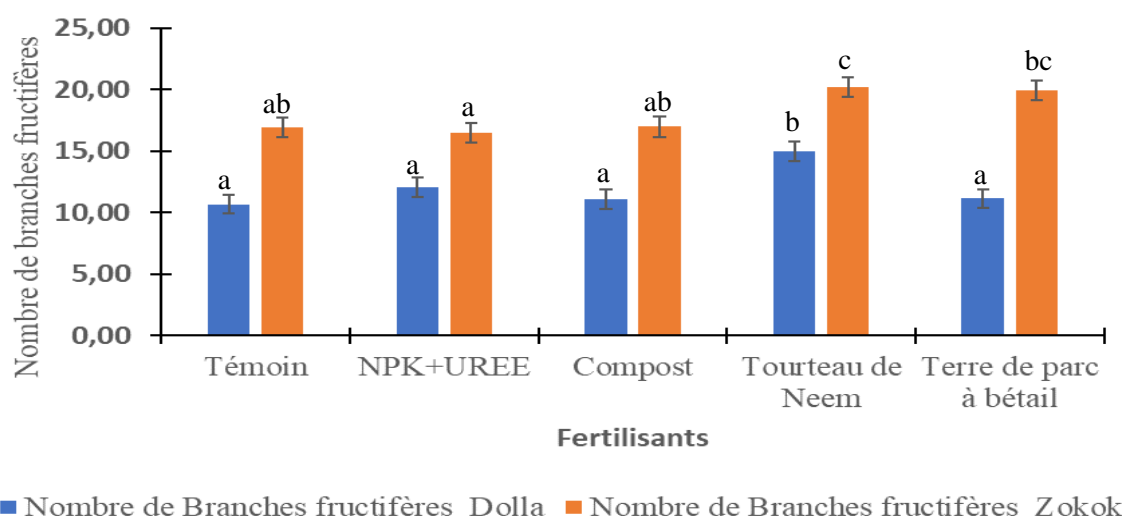


Figure 3. Effets comparés des fertilisants sur le nombre des branches fructifères (pour un site donné, les moyennes suivis de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% (ANOVA))

3.6. Effets des fertilisants organiques sur le nombre de capsules récoltées

Le nombre moyen de capsule par plante tel qu'enregistré sur dans le Tableau 5, n'a pas significativement varié en fonction des fertilisants organiques utilisés sur le site de Zokok-ladéo. Cependant, le nombre de capsules le plus important a été obtenu avec les traitements Compost et TDN avec respectivement une moyenne de

20,17±3,48 et 20,27±4,94 capsules récoltées par plante. Cependant, on observe une différence significative entre les fertilisants sur le site de Dolla (ANOVA au seuil de 5 % avec $P = 0.000151$). Les parcelles ayant reçu le Tourteau de Neem ont porté plus de capsules (en moyenne 12,17±3,47 capsules).

Tableau 5. Nombre moyen de capsules récoltées par site et en fonction des fertilisants

Fertilisants	Nombre de Capsules récoltées site de Dolla	Nombre de Capsules récoltées site de Zokok-ladéo
Témoin	7,17±2,32 ^b	18,57±3,57 ^a
NPK+UREE	10,73±4,84 ^{ac}	18,87±3,34 ^a
Compost	9,37±3,84 ^{ab}	20,17±3,48 ^a
Tourteau de Neem	12,17±3,47 ^a	20,27±4,94 ^a
Terre de parc à bétail	7,57±2,30 ^{bc}	19,83±3,23 ^a

Pour un site donné, les moyennes suivis de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (ANOVA)

3.7. Effets des fertilisants organiques sur le rendement en coton-graine

Le tableau 6 enregistre les rendements moyens en coton-graine sur les deux sites en fonction des fertilisants utilisés.

Tableau 6. Rendement moyen en coton-graine en fonction des fertilisants utilisés et par site

Traitements	Rendement coton-graine Site de Dolla (Kg/ha)	Rendement coton-graine Site de Zokok-ladéo (Kg/ha)
Témoin	712,68±92,18 ^b	1955,56±695,12 ^a
NPK+UREE	1140,47±290,68 ^{ab}	2355,21±430,18 ^{ab}
Compost	956,56±94,51 ^{ab}	2233,42±299,39 ^a
Tourteau de Neem	1355,57±105,77 ^a	3377,10±101,07 ^b
Terre de parc à bétail	865,01±294,67 ^{ab}	2409,13±214,36 ^{ab}

Pour un site donné, les moyennes suivis de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (ANOVA)

Il ressort de ce tableau que les rendements sont significativement influencés par les fertilisants sur les deux sites (ANOVA au seuil de 5 % avec $P = 0,0145$ pour Zokok-ladéo et $P = 0,022$ pour le site de Dolla). Sur les deux sites, le tourteau de Neem a donné les meilleurs rendements (en moyenne 1355,57±105,77 kg/ha à Dolla et 3377,10±101,07 kg/ha à Zokok-ladéo). Cependant, quel que soit le fertilisant, le site de Zokok-ladéo a donné les meilleurs rendements.

4. DISCUSSION

4.1. Effets des traitements sur les paramètres physico-chimiques du sol

Les caractéristiques physiques des sols avant la mise en place des essais sur les deux sites d'étude montrent que ces sols ont une texture convenable pour la culture du coton (texture limono-argileuse à Zokok-ladéo et sablo-argileuse à Dolla). Cependant, les analyses chimiques de ces sols ont montré que les pH de ces sols tendent vers l'acidité (pH de 6 à Zokok-ladéo et 5,8 à Dolla), et la matière organique évolue de façon très lente dans ces sols (C/N supérieur à 10), avec pour conséquence des faibles taux d'azote (inférieur à 2 %) et les faibles teneurs en bases échangeables. Ces observations ont été

démonstrées par plusieurs travaux dans la zone cotonnière du Cameroun (Njomaha, 2003 ; Yoni *et al.*, 2005 ; Ngondjeb *et al.*, 2011 ; Nzossié *et al.*, 2022 ; Yakouba *et al.*, 2022). Ces auteurs sont unanimes sur le fait que la fertilité des sols en zone cotonnière du Cameroun connaît une baisse générale. Cette baisse de la fertilité est la résultante de plusieurs causes parmi lesquelles la baisse ou la lente évolution du taux de matière organique dans les sols dû à la réduction de la durée de la jachère dans les systèmes de cultures, conduisant ainsi à l'acidification des sols.

Après l'incorporation des fertilisants, l'analyse des échantillons des sols prélevés à la récolte, montrent

qu'à l'exception des parcelles ayant reçu le Tourteau Neem sur les deux sites et la terre de parc à bétail à Dolla, le pH qui été modérément acide a légèrement évolué vers la neutralité sur les deux sites et même sur les parcelles témoins. Ces résultats sont conformes à ceux de Traoré *et al.* (2021) qui ont observé une tendance à la hausse du pH après la mise en culture lorsqu'ils travaillaient sur l'effet comparé du tourteau de neem et du compost sur le rendement du sorgho en zone Sud-soudanienne du Burkina Faso.

Par rapport au témoin non fertilisé et aux caractéristiques du sol avant l'application des fertilisants, les taux du carbone organique et de la matière organique ont été améliorés sur l'ensemble des parcelles amendées, améliorants ainsi la teneur en azote du sol sur les deux sites. Les teneurs du sol en magnésium et potassium ainsi que la somme des bases échangeables ont été aussi améliorées sur les parcelles amendées sur les deux sites. En ce qui concerne le phosphore, sa teneur a été améliorée mais pas de manière systématique sur l'ensemble des parcelles ayant reçu les fertilisants organiques. Ces résultats montrent que les fumures organiques incorporées influencent positivement le taux de matière organique et des éléments minéraux dans le sol au cours d'une année culturale. Ces résultats sont conformes à ceux de Yakouba *et al.*, (2022) qui ont obtenus une augmentation de la teneur en matière organique et en éléments minéraux du sol après une année de culture sur des parcelles ayant reçu le Tourteau de Neem et le compost à base de bouse de bovins. C'est le cas aussi de plusieurs autres travaux, notamment ceux de Traoré *et al.* (2021) ; Sawadogo *et al.*, (2021) ; Biaou *et al.*, (2017) qui ont conclu en une augmentation du taux de matière organique et des éléments minéraux dans les sols suite à une incorporation de divers types de matières organiques.

4.2. Effets des fertilisants sur les paramètres de croissances et de rendement du cotonnier

Pour les trois paramètres de croissance mesurés (diamètre au collet des tiges, hauteur des tiges à la récolte et nombre de branches fructifères) et pour le rendement, les résultats ont montré que les fertilisants organiques utilisés ont significativement et positivement influencé ces paramètres. Les performances des parcelles ayant reçu des fertilisants organiques ont dépassé celles de la parcelle témoin et même parfois celles ayant reçu l'engrais minéral. L'effet bénéfique des fertilisants organiques sur les performances agromorphologiques des différentes cultures ont été démontrés par plusieurs études (Mrabet *et al.*, 2011 ; Kitabala *et al.*, 2016 ; Yakouba *et al.*, 2022). Pour les performances exceptionnelles du tourteau

de Neem, ces résultats sont en accord avec ceux de Traore *et al.* (2019) et Traore *et al.* (2018) qui ont constaté dans la zone Ouest du Burkina Faso, une augmentation significative des rendements en grains et en pailles respectivement du riz et du maïs avec l'utilisation du tourteau de Neem. Ils ont expliqué que cette situation est due par le fait que le tourteau de Neem favoriserait la libération des éléments nutritifs qu'il contient pour la nutrition de la culture associée. Par ailleurs, Oyinola *et al.* (2017) et Eifediyi *et al.* (2017) au Nigeria ont obtenu les mêmes effets du tourteau de Neem sur la tomate et le sésame. C'est le cas également sur le riz par Shah *et al.* (2014) et Lokanadhan *et al.* (2012) en Inde. Selon ces auteurs, le tourteau de Neem enrichit non seulement le sol en matières organiques mais diminue les pertes d'azote en inhibant la dénitrification.

5. CONCLUSION

La recherche des fertilisants organiques utilisables dans le système de culture biologique du coton a conduit à mettre en place un essai de fertilisation organique dans deux localités de la zone cotonnière du Cameroun. Il s'agit de Zokok-Ladéo, localité située dans l'arrondissement de Maroua 1^{er}, département du Diamaré, région administrative de l'Extrême-Nord et Dolla qui appartient à l'arrondissement de Pitoa dans le département de la Bénoué, région administrative du Nord. Les traitements comparés étaient : le Compost ; le Tourteau de neem ; la Terre de parc à bétail ; le NPK 20-10-10 +Urée à 46 % de N et le Témoin sans fertilisation.

L'étude a montré que les sols des sites d'étude ont une texture convenable pour la culture du coton (texture limono-argileuse à Zokok-ladéo et sablo-argileuse à Dolla). Cependant, les analyses chimiques de ces sols ont montré que les pH de ces sols tendent vers l'acidité (pH de 6 à Zokok-ladéo et 5,8 à Dolla), et la matière organique évolue de façon très lente dans ces sols (C/N supérieur à 10), avec pour conséquence des faibles taux d'azote (inférieur à 2 %) et les faibles teneurs en bases échangeables. Après l'incorporation des fertilisants, l'analyse des échantillons des sols prélevés à la récolte, montrent que globalement, le pH qui été modérément acide a légèrement évolué vers la neutralité sur les deux sites. Les taux du carbone organique et de la matière organique ont été améliorés sur l'ensemble des parcelles amendées, améliorant ainsi la teneur en azote du sol sur les deux sites. Les teneurs du sol en magnésium, en potassium et la somme des bases échangeables ont été aussi améliorées.

Par ailleurs, les fertilisants organiques utilisés ont significativement et positivement influencé les paramètres de croissance mesurés (diamètre au collet, taille de la plante et nombre de branches fructifères) et les paramètres de rendement (nombre moyen de capsules par plante et rendement en coton-graine) sur les deux sites. Parmi ces fertilisants, c'est le tourteau de Neem qui a induit les meilleurs résultats avec des rendements de 1355,57 kg/ha contre 712,68 kg/ha sur la parcelle témoin à Dolla et 3377,10 kg/ha contre 1955,56 kg/ha sur la parcelle témoin à Zokok-Ladeo. Au vu de ces résultats, les fertilisants organiques testés ont eu un effet bénéfique sur la fertilité du sol et sur les paramètres agro-morphologiques du cotonnier. Ils se présentent ainsi comme des bons fertilisants pour la production biologique du coton. Ainsi, le tourteau de Neem avec sa bonne teneur en carbone organique et en matière organique et la terre de parc à bétail peut être incorporé avant la mise en place de la culture en début de la saison pluvieuse. Le compost peut être apporté en engrais de fond, après la mise en place des cultures. Des essais testant plusieurs doses pourraient contribuer à l'optimisation de l'utilisation de ces fertilisants.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'Ecole Nationale Supérieure de Maroua de l'Université de Maroua et le projet « ProCOTON » de la « Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit » (GIZ) pour leur soutien et leur franche collaboration à la réalisation de cette recherche.

Références

Abdoulaye O., Yombi L., Siaka D., Eyhorn E. & Dischl R., 2008. *Guide de production du Coton biologique et équitable. Un manuel de référence pour l'Afrique de l'Ouest*. Helvetas, 49 p.

Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I. & Voltz M., 2005. *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p.

Bayiha G. D., 2020. *Développement de l'agriculture biologique au Cameroun : Une analyse par l'approche des transitions sociotechniques*. Economies et finances. Montpellier SupAgro; Université de Yaoundé II. Français. NNT : 2020NSAM0016. tel-04069655.

Biaou O. D. B., Saidou A., Bachabi F-X., Padonou G. E. & Balogoun I., 2017. Effet de l'apport de différents types d'engrais organiques sur la fertilité du sol et la production de la carotte (*Daucus carota L.*) sur sol ferralitique au sud Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5), 2315-2326. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.29>

Devèze J. C., 2006. Le coton, moteur du développement et facteur de stabilité du Cameroun du Nord ? *Afrique contemporaine*, 217 (1), 107-120. DOI : 10.3917/afco.217.0107

Efediye E. K., Ahamefule H. E., Remison S. U., Aliyu T. H. & Akanbi N., 2017. Effects of neem seed cake and NPK fertilizer on the growth and yield of sesame (*Sesamum indicum L.*). *Cercetari Agronomice in Moldova*, 2 (170), 57 – 72. DOI : 10.1515/cerce-2017-0015

Estur G. & Knappe M., 2007. *Guide de l'exportateur du coton. Comprendre tous les aspects du commerce International du coton de la ferme jusqu'à la chemise*. Genève: CCI, 2007. XXVIII, 363 p.

FAOSTAT, 2020. *Food and Agricultural Organization of the United Nations*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

Folefack D. P., Kaminski J. & Enam J., 2011. *Note sur le contexte historique et gestion de la filière cotonnière au Cameroun*. Centre pour les Etudes Africaines (CAS) de l'Université de Floride, 20 p.

GIZ, 2021. Restitution d'une étude de faisabilité sur la production du coton biologique au Cameroun. *Bulletin d'Information trimestriel du Cluster Développement Rural*, N° 2, 21 p.

Kitabala M. A., Tshala U. J., Kalenda M. A., Tshijika I. M. & Mufind K. M., 2016. Effets de différentes doses de compost sur la production et la rentabilité de la tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) dans la ville de Kolwezi, Province du Lualaba (RD Congo). *Journal of Applied Biosciences*, 102, 9669 – 9679. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v102i1.1>

Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N. & Bondé D., 2010. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicicultura*, 28(3), 184-189. DOI: 10.4314/ijbcs.v4i6.64953

Lokanadhan S., Muthukrishnan P. & Jeyaraman S., 2012. Neem products and their agricultural applications. *J. Biopest*, 5 (Supplementary), 72-76. http://www.jbiopest.com/users/LW8/efiles/Vol_5_0_72_76F.pdf

MINEPAT, 2022. *Bulletin des exportations des matières premières*, N° 5, pp. 9-15.

Mrabet L., Belghyti D. & Attarassi B., 2011. Étude de l'effet du compost des déchets ménagers sur l'amélioration du rendement de Maïs et de la Laitue. *Afrique Science*, 07(2), 74–84. <http://www.afriquescience.info>

Ngondjeb Y., Nje P. & Havard M., 2011. Déterminants de l'adoption des techniques de lutte contre l'érosion hydrique en zone cotonnière du Cameroun. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 64(1-4), 9-19. DOI : <https://doi.org/10.19182/remvt.10120>

- Njomaha C., 2003. *Durabilité des systèmes de culture dans l'Extrême-Nord Cameroun*, 10 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00131632>
- Nzossié E. J. F., Wakponou D. N. & Bring C., 2022. *Technologie, Innovation et durabilité de la chaîne de valeur soja : étude du front cotonnier camerounais face aux enjeux environnementaux*. ISTE Ltd. London, UK – openscience.fr, 24 p.
- Oyinlola E. F., Paul O. O. & Uyovbisere E. O., 2017. Effect of neem seed cake and inorganic fertilizer on yield of tomato and soil properties in northern guinea savanna of Nigeria. *European Journal of Agriculture and Forestry Research*, 5(4), 1-15. ISSN: 2054-6319 (Print), 2054-6327(online).
- Pallai O., Graveleau A., Memena O., Dessauw D. & Klassou C., 2014. *Sélection cotonnière, rapport annuel complet campagne 2013-2014*, 79 p.
- Pauwels J. M., Van Ranst E., Verloo M. & Mvondo Ze A. D., 1992. *Méthodes d'analyses de sols et de plantes, équipement, gestion de stocks de verrerie et de produits chimiques*. Publications Agricoles – 28. MESIRES/CUDS/INADER Dschang, Cameroun. AGCD Bruxelles, Belgique, 265 p.
- Sawadogo J., Coulibaly P.J.A., Traore B., Bassole M.S.D., Kabore A. & Legma J.B., 2021. Amélioration des propriétés physico-chimiques et microbiologiques des sols par des fertilisants biologiques sous cultures de la tomate en zone Soudano-sahélienne. *Afrique SCIENCE*, 19(4), 189-202. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>
- Shah A. R. & Kumar S., 2014. Integrated nutrient management in transplanted hybrid rice (*Oryza sativa* L.) & its effects on succeeding wheat (*Triticum aestivum*) crop. *Haryana J. Agron.*, 30(1), 37-43. <http://hdl.handle.net/10603/401526>
- Soumaré M, Havard M. & Bachelier B., 2020. Le coton en Afrique de l'Ouest et du Centre : de la révolution agricole à la transition agro-écologique. *Cah. Agric.*, 29(25),37. DOI : 10.1051/cagri/2020037
- Textile Exchange, 2021. *Rapport sur le Marché du coton biologique 2021 de Textile Exchange*. <https://textileexchange.org/>
- Traore A., Traore K., Yameogo P. L., Traore O., Hebié A. K. & Pooda I., 2018. Use of neem (*Azadirachta indica*) seed cake to improve lowland rice production. *International Journal of Development Research*, 8(09), 22842 – 22845. <http://www.journalijdr.com>
- Traore A., Yameogo P. L., Traore K., Bazongo P. & Traore O., 2019. Utilisation du tourteau de neem (*Azadirachta indica*) et de la micro-dose d'engrais minéraux pour la production du maïs en zone Sud soudanienne du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 13(6), 2618 – 2626. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.15>
- Traore, L. P. Yameogo, O. Djindiere, K. Traore, P. Bazongo & Traore O., 2021. Effets comparés du tourteau de neem [*Azadirachta indica* (A. Juss)] et du compost sur le rendement du sorgho [*Sorghum bicolor* (L. Moench)] en zone Sud-soudanienne du Burkina Faso. *J. Appl. Biosci.*, Vol. 163 : 16834 – 16845. DOI : <https://doi.org/10.35759/JABs.163.3>
- Yakouba O., Djakbe D. J., Ndih A. C., Fameni S. T., Haiwa G. & Mohamadou A., 2022. Effets des fientes de volaille, du tourteau de neem [*azadirachta indica* (A. Juss)] et du compost à base de bouse de bovins sur la croissance et le rendement du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) et sur les propriétés physico-chimiques du sol dans la localité de Zokok-Ladéo de la région de l'Extrême-Nord au Cameroun. *Afrique SCIENCE*, 21(4), 138 – 149. <http://www.afriquescience.net>
- Yoni M., Hien V., Abbadie L. & Serpentie G., 2005. Dynamique de la matière organique du sol dans les savanes soudanaises du Burkina Faso. *Cahiers d'Agriculture*, 14(6), 525 – 532. <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30547>
- Zeynab J., Hossein A., Fatemeh T., Kiumars Z., Kindeya G., Steven V. P. & Philippe L., 2017. Organic Farming and Small-Scale Farmers: Main Opportunities and Challenges. *Ecological Economics*, 132, 144-154. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.10.016