



## Développement du gboma (*Solanum macrocarpon* L.) sous l'influence du biochar, de la fréquence d'arrosage et des nématodes à galles en conditions de serre

Néhal T. M. DJAOUGA<sup>1</sup>, Rodrigue V. Cao DIOGO<sup>1,2</sup>, Hugues BAIMEY<sup>1\*</sup>, Tobias GODAU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Parakou, Faculté d'Agronomie, Département des Sciences et Techniques de Production Végétale, BP 123, Parakou, Bénin

<sup>2</sup> Université de Parakou, Faculté d'Agronomie, Département des Sciences et Techniques de Production Animale et Halieutique, BP 123, Parakou, Bénin

<sup>3</sup> Protection et Réhabilitation des Sols pour améliorer la Sécurité Alimentaire (ProSOL-GIZ), 08 BP 1132 Cotonou, Bénin

Reçu le 19 Avril 2020 - Accepté le 20 Juin 2020

### Development of gboma (*Solanum macrocarpon* L.) under the influence of biochar, the frequency of watering and root-knot nematodes in greenhouse conditions

**Abstract:** Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) are key pests affecting qualitative and quantitative yield of nightshade (*Solanum macrocarpon* L.) also called *gboma* in Benin. To overcome the problems related to the use of chemical nematicides by farmers in the management of those pests' populations, this study aimed to assess the effects of biochar made of corn cobs on some physico-chemical properties of the soil, on their population density and on the growth of nightshade. To do so, an experiment was conducted under greenhouse conditions in Parakou, Benin. The experimental design was a simple randomized block with eight replicates per block. The pots treated with biochar received 15g of biochar per kg of soil, i.e. 30g of biochar per pot. Nematodes were inoculated two weeks after transplantation at the density of 2000 second stage juveniles per pot. Nightshade the plants were watered at two-day intervals for regular watering and at the onset of wilting of the leaves for irregular watering. Growth data (plant height, number of leaves, leaf index, circumference of nightshade plants and leaf, stem and root biomass) from plants and population density of nematodes were collected. The results show that the amendment of biochar significantly increases soil moisture ( $p < 0.05$ ) and the growth parameters ( $p < 0.05$ ) of the nightshade. Also, biochar has a significant effect ( $p < 0.05$ ) on the population density of nematodes in roots and soil, the number of galls and the gall index. In addition, the method of watering and its combination with biochar has a significant effect on the population density of nematodes in roots and soil ( $p < 0.05$ ). The biochar made of corn cobs could therefore be recommended as an amendment in an integrated control of nightshade root-knot nematodes to increase the crop productivity even under the presence of these pests.

**Keywords:** Amendment, nightshade, root-knot nematode, watering method, Benin.

**Résumé :** Les nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) sont des ravageurs redoutables affectant le rendement qualitatif et quantitatif de la grande morelle (*Solanum macrocarpon* L.) encore appelé *gboma* au Bénin. Pour pallier aux problèmes liés à l'utilisation des nématicides chimiques par les producteurs dans la gestion des populations de ces ravageurs, la présente étude se propose d'évaluer les effets du biochar à base de rafles de maïs sur quelques propriétés physico-chimiques du sol, sur leur densité de population et sur la croissance de la grande morelle. Pour ce faire, une expérimentation a été conduite en conditions de serre à Parakou, Bénin. Le dispositif expérimental était un bloc aléatoire simple à randomisation totale avec huit répétitions par bloc. Les pots traités au biochar ont reçu 15g de biochar par kg de sol, soit 30g de biochar par pot. Les nématodes ont été apportés deux semaines après transplantation à la densité de 2000 juvéniles de deuxième stade par pot. Les plants de grande morelle ont été arrosés à intervalle de deux jours pour l'arrosage régulier et dès l'apparition d'un

flétrissement des feuilles pour l'arrosage irrégulier. Les données de croissance (hauteur de la plante, nombre de feuilles, indice foliaire, circonférence des plants et biomasses feuilles, tiges et racines de la grande morelle) des plants et celles de la densité de population des nématodes ont été collectées. Les résultats montrent que l'amendement au biochar augmente significativement l'humidité du sol ( $p < 0,05$ ) et les paramètres de croissance ( $p < 0,05$ ) de la grande morelle. Aussi, le biochar a un effet significatif ( $p < 0,05$ ) sur la densité de population des nématodes dans les racines et dans le sol, le nombre de galles et l'indice de galles. De plus, le mode d'arrosage et sa combinaison au biochar a un effet significatif sur la densité de population de nématodes dans les racines et le sol ( $p < 0,05$ ). Le biochar à base de rafles de maïs pourrait alors être recommandé comme un amendement dans la lutte intégrée contre les nématodes à galles du *gboma* pour augmenter la productivité de la culture même en présence de ces ravageurs.

**Mots clés:** Amendement, grande morelle, mode d'arrosage, nématode à galles, Bénin.

## 1. Introduction

Le maraîchage occupe une place importante pour l'alimentation humaine et contribue significativement aux revenus des familles de producteurs en Afrique de l'Ouest avec un revenu net de 185.000 Fcfa/mois (Alagbe et al., 2014; Yarou et al., 2017). Au Bénin la grande morelle (*Solanum macrocarpon* L.) est l'un des légumes-feuilles les plus produits avec une superficie annuelle moyenne emblavée de 643 m<sup>2</sup> par producteur et représente une source importante de revenu pour les maraîchers qui la cultivent (Anihouvi, 2007). Malheureusement, cette culture est fortement attaquée par les nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) qui s'avèrent être parmi les ravageurs les plus redoutables en maraîchage (Affokpon et al., 2012; Afouda et al., 2012). En effet, ils se nourrissent des cellules racinaires et sont à l'origine de la déformation des parties racinaires, la chlorose ou jaunissement des feuilles, le retard de croissance des plantes, la distribution inégale des plantes dans les champs, l'amincissement des feuilles, et le flétrissement des plantes (James et al., 2010). Ils occasionnent des dégâts à l'origine de 60% des pertes de récoltes (Afouda et al., 2012). Pour pallier à ce problème, les pesticides chimiques de synthèse tels que Cadusafos (Rugby® 10 % G), Carbofuran (Furadan® 10 % G), Ethoprop (Mocap® 10 % G), Fosthiazate (Nemathorin® 10 % WG) et Oxamyl (Vydate® 10 % G) sont généralement utilisés (Ahmed, 2012). Cependant, ces pesticides ne sont pas sans danger sur l'environnement et la santé des consommateurs. Ainsi, le recours aux amendements organiques pourraient renforcer les mécanismes de défense de la plante et constituer une alternative dans la réduction des pressions parasitaires des nématodes à galles. Ces amendements, en plus d'améliorer la structure et l'activité biologique du sol peuvent indirectement contribuer à la réduction des parasites

des plantes (Rahman et al., 2014). En effet, ils favorisent la promotion des organismes antagonistes, la stimulation du statut compétitif des organismes non pathogènes et la libération de substances toxiques au cours du processus de décomposition, susceptibles de contrôler ou de supprimer les agents pathogènes y compris les nématodes parasites (Oka, 2010). D'après certaines études, en plus d'améliorer la qualité du sol et la production agricole, le biochar contribue à l'amélioration du pH des sols acides, la rétention d'eau et l'apport direct en nutriments (Laird et al., 2010). Il a été démontré que les biochars diminuent la pourriture des racines de *Fusarium* des asperges, les lésions des tiges de *Phytophthora* dans les arbres et la fonte des semis de *Rhizoctonia* dans le concombre (Rahman et al., 2014). Bien que de nombreuses études aient signalé l'effet des biochars sur les populations fongiques et bactériennes dans le sol, très peu d'études sur l'interaction des biochars avec les nématodes avaient été effectuées jusqu'à ce qu'une étude récente sur le microcosme montre que le biochar de paille de blé augmentait l'abondance des fongivores du sol et diminuait les populations de nématodes phytoparasites (Zhang et al., 2013). La présente étude se veut donc de contribuer à la connaissance sur l'effet du biochar sur les nématodes à galles en particulier en production de grande morelle. Elle vise à apprécier l'effet du biochar à base de rafles de maïs et de la fréquence d'arrosage sur les propriétés physico-chimiques du sol, les paramètres de croissance et le rendement de la grande morelle.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Milieu d'étude et matériel végétal

Cette étude a été réalisée dans la serre implantée sur le site de la ferme de l'Université de Parakou (N 09°18.908', E 002°42.106') de Juillet à Novembre 2019 et les travaux de laboratoire ont été réalisés au laboratoire de nématologie à Djougou dans la même période.

La grande morelle de variété «kombara» a été utilisée pour les travaux. Cette variété à une pureté de 98%.

\* Auteur Correspondant : [baimeyhugues@gmail.com](mailto:baimeyhugues@gmail.com)

Copyright © 2020 Université de Parakou, Bénin

## 2.2. Dispositif expérimental

Après une pépinière qui a duré un mois dans du sol stérilisé (85°C, 72h), les plantules ayant 5-6 feuilles ont été repiquées dans les pots de 2L de contenance (une plantule par pot). Ces pots ont été préalablement remplis avec le sable stérilisé et le biochar à base de rafles de maïs à la dose de 15g par kg de sol. En effet, Sousa & Figueiredo (2016) ont démontré que les doses de biochar comprises entre 10 et 30g avaient un effet positif sur la croissance des plantes. Le biochar a été obtenu suite à la pyrolyse des rafles de maïs dans un four de fabrication artisanal à 350°C. Au total, huit traitements définis par la combinaison des différents facteurs (biochar, nématodes, fréquence d'arrosage) ont été utilisés. Ainsi nous avons:

- T<sub>0</sub> : -biochar-nématodes+arrosage régulier,
- T<sub>1</sub> : -biochar-nématodes+arrosage irrégulier,
- T<sub>2</sub> : +biochar+nématodes+arrosage régulier,
- T<sub>3</sub> : +biochar-nématodes+arrosage irrégulier,
- T<sub>4</sub> : +biochar-nématodes+arrosage régulier,
- T<sub>5</sub> : -biochar+nématodes+arrosage régulier,
- T<sub>6</sub> : -biochar+nématodes+arrosage irrégulier,
- T<sub>7</sub> : +biochar+nématodes+arrosage irrégulier ;

avec : +biochar = traitement contenant du biochar ; - biochar = traitement ne contenant pas du biochar ; arrosage régulier = arrosage des plants tous les deux jours et arrosage irrégulier = arrosage dès l'apparition de flétrissement sur les feuilles des plantes.

Les pots ont été arrangés selon un dispositif de bloc aléatoire simple randomisé et chaque traitement répété huit fois. A l'aide du logiciel CropWat (FAO, 2012), les besoins réels en eau de la grande morelle ont été calculés en fonction du stade de développement de la plante et de la superficie des pots. Ainsi, les quantités d'eau suivantes ont été apportées aux plantes : 50ml de la date du repiquage au 27<sup>e</sup> jour, 63ml du 28<sup>e</sup> au 37<sup>e</sup> jour, 76ml du 38<sup>e</sup> au 49<sup>e</sup> jour, 88ml du 50<sup>e</sup> au 58<sup>e</sup> jour et 130ml du 59<sup>e</sup> au 76<sup>e</sup> jour après repiquage. Les nématodes à galles ont été inoculés deux semaines après repiquage à la densité de 2000 juvéniles de deuxième stade dans un millilitre d'eau soit (2000/ml/pot). Ces juvéniles ont été obtenus suite à l'éclosion des œufs de nématodes collectés sur les racines de la laitue obtenues sur un site maraîcher de Djougou.

## 2.3. Collecte des données

L'expérimentation a duré 76 jours à compter du jour de repiquage des plants. Différentes données ont été collectées toutes les deux semaines en ce qui concerne les conditions du milieu (Humidité et pH des substrats), le nombre de galles et l'indice de galles, la densité de population de nématode, la croissance et la biomasse des feuilles, des tiges et des racines des plants. Concernant la croissance et la biomasse, plusieurs variables ont été mesurées. Il s'agit de :

- nombre de feuilles produites par plant: il a été relevé chaque deux semaines dès le repiquage jusqu'à la maturité ;
- la hauteur des plants : elle a été mesurée du collet jusqu'à l'apex au niveau du point d'insertion de la dernière feuille apparente. Cette mesure a été prise à partir du jour de repiquage ;
- l'indice foliaire : la longueur et la largeur du limbe de chaque feuille d'un plant ont été mesurées afin de calculer l'indice foliaire. Ce calcul a été fait suivant la formule :
- Indice foliaire =  $(L \cdot l) \cdot k$  avec L = longueur, l = largeur et K=0,67 (Gomez, 1972) ;
- le diamètre au collet : il a été mesuré à l'aide de la règle à coulisse le jour de la récolte ;
- la biomasse des plants : à la récolte (76 jours après repiquage), les feuilles, tiges et racines des plants ont été pesées séparément.
- Pour les paramètres relatifs aux nématodes et la densité de leurs populations
- le nombre de galles : il a été déterminé par comptage des galles présentes dans un gramme (1g) de racines fines au binoculaire ;
- l'indice de galles : il a été déterminé à l'aide de la table d'indexation pour les nématodes à galles dont l'échelle est de 0 à 10 avec pour 0 = pas de galles et 10 = toutes les racines ont des galles, plus de système racinaire, généralement plante morte (Coyne et al., 2018) ;
- Les racines provenant des plants ayant reçu l'inoculum de nématodes ont été soigneusement lavées et rincées. Ces racines ont été finement découpées à l'aide d'une paire de ciseaux. Les morceaux de racines ont été soigneusement mélangés et un échantillon de 50g de racines pris par pot pour l'extraction des nématodes en utilisant le dispositif de Baermann modifié (Coyne et al., 2018). Les nématodes ont été aussi extraits de 50 g de sol prélevé de chaque pot en utilisant le même dispositif. Pour ce faire, le sol contenu dans chaque pot a été soigneusement mélangé avant qu'un échantillon de 50g ait été pris. Dans les deux cas (des racines et du sol) chaque échantillon a été mis dans un tamis tapissé à l'intérieur de papier filtre et le tout a été placé dans une assiette en plastique. Ensuite, 150 ml d'eau a été rajoutée jusqu'à couvrir légèrement l'échantillon de sol ou de racines afin de favoriser la migration des nématodes des échantillons vers l'eau qui constitue le milieu d'extraction. Après 72 h, le tamis contenant le papier filtre sur lequel est déposé chaque échantillon a été retiré délicatement de l'assiette. Les suspensions de nématodes contenues dans les différentes assiettes ont été collectées et transférées dans des tubes gradués et après 30 min de décantation, les nématodes ont été comptés au binoculaire. La densité de population des nématodes contenus dans chaque tube a été évaluée trois fois ; et chaque fois dans un volume de

5 ml de suspension transférée dans une boîte de Petri de 9cm de diamètre quadrillée, et la densité de population des nématodes par gramme de sol ou de racines calculée par extrapolation.

## 2.4. Analyses statistiques des données

Les données collectées ont été saisies à l'aide du tableur EXCEL 2013. Les paramètres agro-morphologiques, les propriétés physico-chimiques (pH et humidité) du sol ont été soumises à une analyse de variance ANOVA à trois facteurs (biochar, nématodes et fréquence d'arrosage) avec le logiciel R version 3.4.4. Le modèle GLM (Modèle Linéaire Généralisé) a été utilisé pour les variables densité de population de nématodes au niveau des racines et du sol et du nombre de données sur les galles produites par les nématodes. Mais le modèle LM (Modèle linéaire simple) a été utilisé pour l'analyse de l'indice de galles. Ces différents modèles ont été utilisés suite à la vérification de la normalité de la distribution des données avec le test de Shapiro Wise. Le test de SNK a permis de faire la comparaison deux à deux en cas de différence significative entre les traitements au seuil de 5%.

## 3. Résultats

### 3.1. Effet du biochar, de l'arrosage et des nématodes sur le pH et l'humidité du sol et les paramètres agro-morphologiques de la grande morelle

Les résultats de l'effet des différents facteurs sur les propriétés physiques du sol et sur les paramètres agro-morphologiques sont résumés dans le Tableau 1. On ne note pas de différence significative entre le témoin et le traitement au biochar au niveau des valeurs du pH ( $p > 0,05$ ). De même, il convient de noter que l'application du biochar seul ( $p < 0,05$ ) et l'arrosage seul ( $p < 0,05$ ) ainsi que l'interaction biochar\*nématodes ( $p < 0,05$ ) ont eu un effet significatif sur le taux d'humidité du sol dans les pots. L'analyse de variance réalisée sur les paramètres agro-morphologiques de la grande morelle a montré que l'arrosage a un effet significatif sur l'indice foliaire ( $p < 0,05$ ) et le rendement en tige ( $p < 0,05$ ). Quant au biochar, son application a eu d'effets significatifs sur l'indice foliaire ( $p < 0,05$ ), la circonférence au collet ( $p < 0,05$ ), la biomasse feuille ( $p < 0,05$ ) et la biomasse racine ( $p < 0,05$ ). Concernant l'effet des nématodes, un effet régressif a été observé sur la biomasse racine ( $p < 0,05$ ). Cependant, l'interaction biochar\*nématodes a eu un effet positif sur la biomasse racine avec ( $p < 0,05$ ). Aucun des facteurs pris isolément ou en interaction n'a eu d'effet significatif sur la hauteur des plants de la grande morelle.

Le Tableau 2 présente les résultats de l'analyse de variance réalisée afin de mieux comprendre les

différents effets du biochar sur les différents paramètres étudiés. Notons que les plants de la grande morelle ayant reçu le biochar ont présenté de meilleures performances de croissance.

Le Tableau 3 montre que l'arrosage a eu un effet significatif sur la biomasse feuille, tige et sur l'humidité du sol ( $p < 0,05$ ). On observe également que les plants de grande morelle ayant reçu un arrosage régulier ont produit plus de biomasse feuille. Toutefois, la biomasse tige est plus faible comparativement à celle des plants ayant reçu un arrosage irrégulier (Tableau 3).

### 3.2. Effet du biochar, de la fréquence d'arrosage et de l'infestation aux nématodes sur la densité de population des nématodes à galles dans le sol et les racines, le nombre de galles et l'indice de galles de la grande morelle produite sous serre

Le Tableau 4 montre un effet significatif ( $P < 0,05$ ) du biochar sur la densité de population de nématodes à galles dans le sol et dans les racines, le nombre de galles et l'indice de galles de la grande morelle. La même tendance a été observée avec l'interaction entre le biochar et l'arrosage sauf pour le nombre de galles et l'indice de galles ( $P > 0,05$ ). Le biochar combiné à l'infestation des nématodes a un effet significatif ( $P < 0,05$ ) sur toutes les variables étudiées tandis que la combinaison des trois facteurs présente un effet significatif ( $P < 0,05$ ) seulement sur la densité de population de nématodes dans le sol et les racines (Tableau 4).

## 4. Discussion

Le présent travail vise à étudier les effets du biochar à base de rafles de maïs ou de sa combinaison avec la fréquence d'arrosage ou de l'infection des nématodes sur l'amélioration des conditions biophysiques du sol et la réduction des pressions des nématodes à galles sur la grande morelle cultivée sous serre à Parakou. Elle nous permet de comprendre le rôle du biochar et des modes d'arrosage et de leur interaction de même que l'interaction du biochar et des nématodes sur l'indice de galles de la grande morelle. Ces résultats ne corroborent pas ceux de Schulz & Glaser (2012) qui ont enregistré en culture de maïs en Allemagne une augmentation du pH des traitements au biochar de 1,5 unité comparativement à celui du traitement témoin. Cela pourrait s'expliquer par la nature et les propriétés du sol utilisé dont le pH était de 7,5 en moyenne au cours de notre expérimentation. En effet, il a été démontré que l'application du biochar aux sols arables induit une augmentation du pH et de la capacité de rétention des nutriments (Atkinson et al., 2010). Aussi, les amendements du biochar sur les sols très altérés et acides pourraient être à l'origine de l'augmentation du pH et de la teneur en humidité de ces sols (Harel et al., 2013; Huang et al., 2015).

Tableau 1 : Effet du biochar, de l'arrosage, et des nématodes sur les propriétés physico-chimiques du sol et sur les paramètres agro-morphologiques de la grande morelle

T	Propriétés physiques du sol			Paramètres agro-morphologiques				
	pH	Humidité (%)	Hauteur (cm)	Indice foliaire	Circonférence du collet (cm)	Biomasse feuille (g/plant)	Biomasse tige (g/plant)	Biomasse racine (g/plant)
A	0,25	0,0003***	0,31	0,0118*	0,12	0,34	0,0445*	0,13
B	0,45	0,0021**	0,12	0,04*	0,0145*	0,0120*	0,24	<0,0001***
N	0,24	0,85	0,89	0,55	0,20	0,52	0,63	0,0237*
A*B	0,84	0,22	0,60	0,34	0,33	0,97	0,84	0,48
A*N	0,57	0,15	0,99	0,99	0,84	0,56	0,88	0,92
B*N	0,38	0,0208*	0,77	0,39	0,43	0,79	0,91	0,0053**
A*B*N	0,80	0,63	0,63	0,85	0,62	0,13	0,55	0,98

T : Traitements, A : Arrosage, B : Biochar, N : Nématodes, A\*B : Interaction Arrosage\*Biochar, A\*N : Interaction Arrosage\*Nématodes, B\*N : Interaction Biochar\*Nématodes, A\*B\*N : Interaction Arrosage\*Biochar\*Nématodes, \* : significatif au seuil de 10% ; \*\* : significatif au seuil de 5% ; \*\*\* : significatif au seuil de 1% ;

Tableau 2 : Effet du biochar sur les paramètres agro-morphologiques de la grande morelle.

Biochar	Circonférence du collet (cm)	Indice foliaire	Biomasse tige (g/plant)	Biomasse racine (g/plant)	Biomasse feuille (g/plant)
- biochar	6,2 ± 1,50 <sup>b</sup>	405,5 ± 217,75 <sup>b</sup>	4,4 ± 2,77 <sup>a</sup>	6,3 ± 4,91 <sup>b</sup>	1065,4 ± 532,79 <sup>b</sup>
+biochar	6,9 ± 0,69 <sup>a</sup>	525,2 ± 154,49 <sup>a</sup>	5,1 ± 1,59 <sup>a</sup>	12,6 ± 4,32 <sup>a</sup>	1360,1 ± 340,04 <sup>a</sup>
p	0,0145*	0,0476*	0,237	0,000001***	0,0120*

- biochar: absence de biochar ; +biochar : présence de biochar ; p = probabilité ; \* : significatif au seuil de 10% ; \*\* : significatif au seuil de 5% ; \*\*\* : significatif au seuil de 1% ; Dans une même colonne, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5% (Test de SNK). ns = non significatif

Tableau 3 : Effet de l'arrosage sur les paramètres agro-morphologiques de la grande morelle et l'humidité du sol

Fréquence d'arrosage	Circonférence du collet (cm)	Indice foliaire	Biomasse feuille (g/plant)	Biomasse tige (g/plant)	Humidité du Sol (%)
irrégulier	6,4 ± 1,00 <sup>a</sup>	418,8 ± 171,48 <sup>b</sup>	4,235 ± 1,75 <sup>a</sup>	540 ± 260,05 <sup>a</sup>	5,2 ± 1,06 <sup>b</sup>
régulier	6,8 ± 1,38 <sup>a</sup>	511,9 ± 211,63 <sup>b</sup>	5,374 ± 2,58 <sup>b</sup>	425 ± 176,54 <sup>b</sup>	6,0 ± 1,39 <sup>a</sup>
p	0,1211 ns	0,0118*	0,0436*	0,0445*	0,0002***

Irrégulier: Arrosage irrégulier ; Régulier: Arrosage régulier ; p = probabilité ; \* : significatif au seuil de 10% ; \*\* : significatif au seuil de 5% ; \*\*\* : significatif au seuil de 1% ; Dans une même colonne, les moyennes suivies de différentes lettres sont statistiquement différentes au seuil de 5% (Test de SNK) ; ns = non significatif

Tableau 4 : Effet du biochar, des nématodes et de l'arrosage sur la densité de population de nématodes des racines et du sol, le nombre de galles et l'indice de galles

	Densité de population de nématodes dans les racines	Densité de population de nématodes dans le sol	Nombre de galles	Indice de galles
Arrosage				
Arrosage régulier	3,1 ± 0,76 <sup>b</sup>	1,1 ± 0,30 <sup>b</sup>	5,3 ± 1,27 <sup>b</sup>	0,8 ± 0,17 <sup>b</sup>
Arrosage irrégulier	5,1 ± 1,73 <sup>a</sup>	2,1 ± 0,59 <sup>a</sup>	6,5 ± 1,49 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,15 <sup>a</sup>
Biochar				
+Biochar	4,7 ± 1,74 <sup>a</sup>	1,0 ± 0,29 <sup>b</sup>	8 ± 1,67 <sup>a</sup>	1,0 ± 0,08 <sup>a</sup>
-Biochar	3,5 ± 0,76 <sup>b</sup>	2,1 ± 0,59 <sup>a</sup>	3,9 ± 0,90 <sup>b</sup>	0,5 ± 0,20 <sup>b</sup>
Nématodes				
+Nématode	8,2 ± 1,59 <sup>a</sup>	3,2 ± 0,54 <sup>a</sup>	11,9 ± 1,25 <sup>a</sup>	1,5 ± 0,13 <sup>a</sup>
-Nématode	0,0 ± 0,00 <sup>b</sup>	0,0 ± 0,00 <sup>b</sup>	0,0 ± 0,00 <sup>b</sup>	0,0 ± 0,00 <sup>b</sup>
Arrosage + Biochar + Nématodes				
Arrosage	0,182539	0,117	0,245307	0,21751
Biochar	0,014568*	0,0008603***	0,001077**	0,01056*
Nématodes	0,000005741***	0,00000004857***	1,916e-12***	1,357e-13***
Arrosage:Biochar	0,008654***	0,0177286*	0,324738	0,21751
Arrosage:Nématodes	0,182539	0,0199223*	0,245307	0,21751
Biochar:Nématodes	0,014568*	0,0008603***	0,001077**	0,01056*
Arrosage:Biochar:Nématodes	0,008654**	0,0177286*	0,324738	0,21751

- biochar: absence de biochar ; +biochar : présence de biochar ; -Nématode=absence de nématodes ; +nématode=présence de nématode ; Arrosage+Biochar+Nématodes : interaction entre biochar, arrosage et nématodes ; p=probabilité ; \* : significatif au seuil de 10% ; \*\* : significatif au seuil de 5% ; \*\*\* : significatif au seuil de 1% ; Dans une même colonne, les moyennes suivies de différentes lettres sont statistiquement différentes au seuil de 5% (Test de SNK)

Par ailleurs, selon Hagner et al. (2016), on ne note aucun effet du biochar de bouleau sur le pH à une dose d'application en dessous de 80g/L de sol. Cela pourrait expliquer nos résultats car nous avons appliqué 15g/L de sol (Sousa & Figueiredo, 2015). Toutefois, nos résultats montrent que les pots ayant reçu le biochar ont eu une humidité élevée comparativement aux pots ne l'ayant pas reçu. Ces résultats sont conformes à ceux de Schulz & Glaser (2012) qui ont trouvé que la teneur en eau des pots au traitement biochar de hêtre avait quintuplé comparativement à celle des pots au témoin sans biochar. De plus, la capacité de rétention d'eau du sol serait améliorée de manière significative par l'amendement au biochar dû à sa forte porosité (Fischer et al., 2019). De plus, nos résultats ont montré que l'amendement du biochar a permis l'augmentation des paramètres de croissance de la grande morelle dont l'indice foliaire, la biomasse feuille et la circonférence au collet des plants de la grande morelle. Plus intéressant est l'augmentation de la biomasse racine et le contrôle de l'indice de galles en présence des nématodes (Tableaux 1 & 4). Les résultats des travaux de Sousa & Figueiredo (2016) vont dans le même sens que les nôtres. En effet, selon ces auteurs, le biochar de boue d'épuration permet l'augmentation de tous les paramètres de croissance du radis en réduisant le lessivage des nutriments. Cette réponse des plantes au biochar a également été prouvée par plusieurs études avec différents types de biochars et de cultures: sur l'avoine avec du biochar de bois de hêtre (Schulz et al., 2013), sur les épinards avec du biochar de balles de riz (Varela Milla et al., 2013), sur la tomate avec du biochar de boue d'épuration (Khan et al., 2013) et sur le maïs avec du biochar de déchets verts de tomate (Smider & Singh, 2014). Ce développement adéquat des plantes pourrait être dû aux caractéristiques agronomiques du biochar, qui augmente la disponibilité des macros et micronutriments due à ces larges surfaces poreuses (Fischer et al., 2019).

Les résultats de nos travaux montrent également que les pots amendés au biochar ont enregistré le nombre de galles et la densité de populations de nématodes les plus élevés comparativement à ceux des pots non amendés au biochar. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les racines de la grande morelle ayant évolué dans les pots amendés au biochar ont développé d'importantes racines comparativement aux plants ayant évolué dans les pots non amendés au biochar. En effet, les plants non amendés au biochar avaient une masse racinaire plus ou moins faible comparativement à ceux amendés.

Aussi, on note qu'avec un arrosage irrégulier, la densité de population de nématodes dans les racines est plus élevée qu'avec un arrosage régulier. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que les nématodes en milieu sec dans le but de trouver de l'humidité s'accumulent dans les racines de la plante. Par contre, en milieu humide, les conditions de prolifération étant réunies, les nématodes se multiplient plus rapidement ce qui

s'explique par la formation des galles correspondant aux sites d'installation des femelles. On peut donc conclure que malgré leur pénétration dans les racines, le niveau d'infestation reste faible avec l'application du biochar. Des résultats similaires ont été observés avec l'application de biochar dans un champ de blé où il n'y avait aucun effet significatif sur l'abondance totale de nématodes avec une application à court terme de biochar (9 mois en culture de blé) (Zhang et al., 2013). Par contre, de nombreuses études ont montré une réduction des populations de nématodes parasites avec l'utilisation d'amendements organiques. D'autres n'ont montré aucun changement ou augmentation des populations, l'efficacité de ces amendements dépendant principalement du matériel de départ (Renčo & Kováčik, 2012). Selon Lehmann (2007), de toute évidence des recherches supplémentaires doivent être effectuées pour quantifier dans quelle mesure le biochar déclenche la défense des plantes et déterminer les conditions les plus efficaces pour supprimer l'infection par les nématodes car le biochar présente une grande variabilité dans ses propriétés physiques et chimiques.

## 5. Conclusion

Au terme de cette étude, les résultats montrent que :

- le biochar contribue au maintien de l'humidité du sol ;
- le biochar permet l'amélioration de l'indice foliaire, de la biomasse foliaire, racinaire et de la circonférence au collet de la grande morelle;
- l'amendement du biochar permet d'obtenir un nombre de galles moins important ;
- la combinaison biochar-arrosage régulier permet d'enregistrer la meilleure performance notamment en ce qui concerne les paramètres de croissance.

Par ailleurs, l'expérimentation a été conduite en saison pluvieuse dans des conditions de température basse et d'humidité élevée comparativement à la saison sèche. Etant la première étude ayant recherché les effets du biochar sur les nématodes en cultures de la grande morelle, il serait bien que cette étude soit réalisée en saison sèche et pluvieuse afin de mieux comprendre les effets du biochar sur les nématodes.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions le projet ProSol (Projet de Protection et Réhabilitation des Sols pour améliorer la Sécurité Alimentaire (ProSol)/GIZ) qui a financé cette recherche et les techniciens de laboratoire pour leur assistance.

## CONFLIT D'INTERET

Les auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêt.

## REFERENCES

- Afouda L., Baimey H., Bachabi F.X., Sero-Kpera D.H. B. R. 2012. Effet de l'hyptis (*Hyptis suaveolens*), du neem (*Azadirachta indica*), du vernonia (*Vernonia amygdalina*), et de l'amarante (*Amaranthus* sp.) sur les nématodes à Galles (*Meloidogyne* spp.) en cultures maraîchères, *Agronomie Africaine*, 24 (3), pp. 209–218. Available from: <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/87010/76776>.
- Affokpon, A., Dan, C. B. S., Houedjissi, M. E., Hekpazo, B. A. et Tossou, C. 2012. L'efficacité des dérivés de graines de neem contre les nématodes à galles en cultures maraîchères diffère en fonction du type de dérivé. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)* 72 : 48-58
- Ahmed N. S. 2012. Efficacy of some granular nematocides against root-knot nematode, meloidogyne incognita associated with tomato, *Pakistan Journal of Nematology*, 30 (1), pp. 41–47.
- Allagbe H., Aitchedji M. and Yadouleton A. 2014. Genesis and development of urban vegetable farming in Republic of Benin Genese et développement du maraichage urbain en Republique du Benin, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 7 (1), pp. 123–133.
- Anihouvi P. 2007. Pratiques culturales et teneur en éléments anti nutritionnels (nitrates et pesticides) du *Solanum macrocarpum* au sud du Bénin., 7 (4), pp. 1–21.
- Atkinson C. J., Fitzgerald J. D. and Hipps N. A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review, *Plant Soil*, pp. 1–18. DOI:10.1007/s11104-010-0464-5.
- Coyne D. L., Nicol J. M. and Claudius-Cole B. 2018. *Practical plant nematology: A field and laboratory guide*. 3rd edition, International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria.
- Fischer B. M. C., Manzoni S., Morillas L., Garcia M., Johnson M. S. and Lyon S. W. 2019. Science of the Total Environment Improving agricultural water use efficiency with biochar – A synthesis of biochar effects on water storage and fluxes across scales, *Science of the Total Environment*, 657, pp. 853–862. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.11.312.
- Gomez K. A. 1972. *Techniques for field experiments with rice*, *Journal of Chemical Information and Modeling*. International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Philippines.
- Hagner M., Kemppainen R., Jauhiainen L., Tiilikkala K. and Setälä H. 2016. The effects of birch (*Betula* spp.) biochar and pyrolysis temperature on soil properties and plant growth, *Soil and Tillage Research*, 163, pp. 224–234. DOI:10.1016/j.still.2016.06.006.
- Harel Y. M., Mehari Z. H., Elad Y. and Rav-david D. 2013. Induced systemic resistance in tomato (*Solanum lycopersicum*) by biochar soil amendment, *Biological Control of Fungal and Bacterial Plant Pathogens*, 86, pp. 59–64.
- Huang W., Ji H., Gheysen G., Debode J. and Kyndt T. 2015. Biochar-amended potting medium reduces the susceptibility of rice to root-knot nematode infections, *BMC Plant Biology*, pp. 1–15. DOI:10.1186/s12870-015-0654-7.
- James B., Atcha-Ahowé C., Godonou I., Baimey H., Goergen G., Sikirou R. and Toko M. 2010. Gestion intégrée des nuisibles en production maraîchère : Guide pour les agents de vulgarisation en Afrique de l'Ouest., *Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA), Ibadan, Nigeria.*, pp. 120 p.
- Khan S., Wang N., Reid B. J., Freddo A. and Cai C. 2013. Reduced bioaccumulation of PAHs by *Lactuca sativa* L. grown in contaminated soil amended with sewage sludge and sewage sludge derived biochar, *Environmental Pollution*, 175, pp. 64–68. DOI:10.1016/j.envpol.2012.12.014.
- Laird D., Flemming P., Wang B. and Horton R. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Mid-western agricultural soil, *Geoderma*, 158, pp. 436–442. DOI:10.1016/j.geoderma.2010.05.012.
- Lehmann J. 2007. Bio-energy in the black, *Frontiers in Ecology and Environment*, 5 (7), pp. 381–387.
- Oka Y. 2010. Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments-A review, *Applied Soil Ecology*. DOI:10.1016/j.apsoil.2009.11.003.
- Rahman L., Whitelaw-Weckert M. A. and Orchard B. 2014. Impact of organic soil amendments, including poultry-litter biochar, on nematodes in a Riverina, New South Wales, vineyard, *Soil Research*, 52 (6), pp. 604–619. DOI:10.1071/SR14041.
- Renčo M. and Kováčik P. 2012. Response of plant parasitic and free living soil nematodes to composted animal manure soil amendments, *Journal of Nematology*, 44 (4), pp. 329–336.

- Schulz H., Dunst G. and Glaser B. 2013. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility, *Agronomy for Sustainable Development*, 33 (4), pp. 817–827. DOI:10.1007/s13593-013-0150-0.
- Schulz H. and Glaser B. 2012. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175 (3), pp. 410–422. DOI:10.1002/jpln.201100143.
- Smider B. and Singh B. 2014. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 191, pp. 99–107. DOI:10.1016/j.agee.2014.01.024.
- Sousa A. A. T. C. and Figueiredo C. C. 2016. Sewage sludge biochar : effects on soil fertility and growth of radish, *Biological Agriculture & Horticulture*, 32 (2), pp. 127–138. DOI:10.1080/01448765.2015.1093545.
- Varela Milla O., Rivera E. B., Huang W. J., Chien C. C. and Wang Y. M. 2013. Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochars and their effect on the growth of water spinach in a field test, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13 (2), pp. 251–266. DOI:10.4067/S0718-95162013005000022.
- Yarou B. B., Silvie P., Komlan F. A., Mensah A., Alabi T., Verheggen F. and Francis F. 2017. Plantes pesticides et protection des cultures maraîchères en Afrique de l’Ouest (Synthèse bibliographique), *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 21(4), pp. 288-304.
- Zhang X. K., Li Q., Liang W. J., Zhang M., Bao X. L. and Xie Z. Bin 2013. Soil nematode response to biochar addition in a chinese wheat field, *Pedosphere*, 23 (1), pp. 98–103. DOI:10.1016/S1002-0160(12)60084-8.