

Effet du biochar et des feuilles de *Tithonia diversifolia* combiné à l'engrais minéral sur la culture du maïs (*Zea mays* L.) et les propriétés d'un sol ferrallitique à Kinshasa (RDC)

Bonaventure Lele Nyami ⁽¹⁾, Claude Kachaka Sudi ⁽¹⁾, Jean Lejoly ⁽²⁾

⁽¹⁾ Université de Kinshasa. Faculté des Sciences Agronomiques. Département de Gestion des Ressources Naturelles. Avenue de l'Université. BP 127. Commune de Lemba. Kinshasa XI (RDC). E-mail : lelebonaventure72@yahoo.fr

⁽²⁾ Université Libre de Bruxelles et ONG GiAgro. Avenue de l'Université. Commune de Lemba. BP 15 373. Kinshasa XI (RDC).

Reçu le 11 septembre 2014, accepté le 2 octobre 2015.

Description du sujet. Cet article traite de l'amélioration de la productivité des sols sableux de Kinshasa (RDC) par le recours aux intrants locaux en complément à la fertilisation minérale.

Objectifs. Évaluer l'effet d'un apport de charbon de bois broyé (biochar) et de feuilles de *Tithonia diversifolia* sur les propriétés du sol et la performance de la culture de maïs.

Méthode. Cinq traitements et un témoin : T₀ (Témoin), T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄), T₂ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + 30 t·ha⁻¹ biochar), T₃ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + 8 t·ha⁻¹ *T. diversifolia*), T₄ ([N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄] + 30 t·ha⁻¹ biochar), T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉) ont été répétés quatre fois dans un dispositif en blocs complets randomisés. Des analyses physiques et chimiques ont été effectuées sur le sol, les feuilles de *T. diversifolia* et la biomasse du maïs.

Résultats. Le biochar et les feuilles de *T. diversifolia* combinés à l'engrais minéral ont augmenté la teneur en carbone, en potassium et la CEC du sol ainsi que le rendement en grains, les exportations et le coefficient apparent d'utilisation des éléments minéraux par la culture de maïs. Les traitements au biochar ont réduit l'acidité et la saturation en aluminium et augmenté la disponibilité du phosphore du sol. Au regard de l'indice d'acceptabilité, les T₃ (IA = 3,06), T₄ (IA = 2,92) et T₂ (IA = 2,14) peuvent être acceptés facilement par les agriculteurs.

Conclusions. Il est possible d'améliorer la productivité des sols sableux de Kinshasa par l'usage du biochar et de feuilles de *T. diversifolia* en complément à la fertilisation minérale.

Mots-clés. Charbon de bois, *Tithonia diversifolia*, *Zea mays*, apport d'engrais, engrais minéral, sol sableux, fertilité du sol, République Démocratique du Congo.

Effect of the use of biochar and leaves of *Tithonia diversifolia* combined with mineral fertilizer on maize (*Zea mays* L.) and the properties of ferrallitic soil in Kinshasa (DRC)

Description. This article deals with the improvement of the productivity of (poor) sandy and acidic soils in Kinshasa (DRC) using local natural resources in addition to mineral fertilization.

Objectives. The objective of this study was to evaluate the effect of ground charcoal (biochar) and *Tithonia diversifolia* leaves combined with mineral fertilizer on soil properties and on the performance of the maize crop.

Method. Five treatments and an eyewitness: T₀ (control), T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄), T₂ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + 30 t·ha⁻¹ biochar), T₃ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + 8 t·ha⁻¹ *T. diversifolia*), T₄ ([N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄] + 30 t·ha⁻¹ biochar), T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉) repeated four times were compared in a randomized complete block. Physical and/or chemical analyses were carried out on the ground, on *T. diversifolia* leaves and on maize biomass.

Results. The results showed that application of biochar and *T. diversifolia* leaves combined with mineral fertilizers increased the carbon content, the potassium content and the cation exchange capacity of the soil as well as grain yield, exports of mineral elements and the apparent coefficient of mineral elements use by the crop. Treatments under biochar reduced acidity and aluminum saturation with an improvement of the soil's phosphorus availability. Taking into account the acceptability index, the T₃ (AI = 3.06), T₄ (AI = 2.92) and T₂ (AI = 2.14), it would be possible for these treatments to be easily accepted by farmers.

Conclusions. The results of this study provide an opportunity to improve the productivity of poor soils in Kinshasa and to increase the crop performance for a period of two campaigns with the use of biochar and *T. diversifolia* leaves in addition to mineral fertilizer.

Keywords. Charcoal, *Tithonia diversifolia*, *Zea mays*, fertilisation, inorganic fertilizers, sandy soils, soil fertility, Democratic Republic of the Congo.

1. INTRODUCTION

Les sols de la province de Kinshasa et ses environs présentent pour la plupart une texture sableuse (85 % de sable environ), une structure particulière et un pH acide (5 en moyenne). Ces sols sont soumis à une forte minéralisation de leur matière organique et un lessivage accru des éléments minéraux causés par les pluies intenses et les fortes températures. En plus, pour y cultiver, les agriculteurs ont recours à la coupe à blanc et au brulis en vue de dégager le terrain. L'agriculture itinérante sur brulis a pour conséquences la perte rapide de la fertilité, de l'activité biologique, l'érosion du sol, la réduction de la recharge de la nappe aquifère, etc. (Serpantié, 2009). Ce système, combiné aux processus pédologiques naturels, aboutit à des sols fortement dégradés et très acides (Pieter et al., 2012). Ces sols présentent des contraintes chimiques et biologiques liées à l'acidité, à la toxicité aluminique, à une forte capacité de rétention du phosphore (P), à une forte désaturation en cations échangeables (Ca, Mg, K, Na) ayant pour effet la réduction drastique de la production agricole (Dabin, 1984 ; Kadiata et al., 2003 ; Ruganzu, 2009 ; Pieter et al., 2012). Sur le plan agricole, les conséquences se traduisent par de faibles rendements pour les principales cultures vivrières, notamment le maïs, dont le rendement en grains ne dépasse guère 1 t·ha⁻¹ (Van Den Berghe et al., 1990 ; Chianu et al., 2002 ; Adjei-Nsiah et al., 2007). Malgré l'utilisation des engrais chimiques, le rendement des principales cultures baisse significativement après une saison culturale à cause de la lixiviation des éléments minéraux (Vanlauwe et al., 2006 ; Adjei-Nsiah et al., 2007). Ainsi, la mise en valeur de ces sols exige des amendements, organiques ou calcaires, pour améliorer leurs propriétés physiques et rentabiliser l'utilisation des fertilisants minéraux (UyoYbesere et al., 2000 ; Muna-Mucheru et al., 2007). La recherche sur les espèces végétales ayant un potentiel pour améliorer la fertilité des sols en RDC s'est focalisée principalement sur les légumineuses fixatrices d'azote (Koy, 2010 ; Lele, 2010) et très peu d'attention a été accordée aux espèces non fixatrices. De ce fait, il s'avère nécessaire d'évaluer d'autres espèces et d'autres intrants en vue de diversifier les options disponibles. C'est ainsi que dans le cadre de cette étude, nous combinons l'engrais minéral au charbon de bois broyé (biochar) ou aux feuilles fraîches de *Tithonia diversifolia* (Hemsley A. Gray) en vue d'évaluer leurs effets sur les propriétés du

sol, le rendement en grains du maïs (*Zea mays* L.), les exportations et le coefficient apparent d'utilisation des éléments minéraux par la culture de maïs pendant deux campagnes culturales.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel

Site expérimental. L'étude a eu lieu au jardin expérimental de la Faculté des Sciences de l'Université de Kinshasa, dans la ville de Kinshasa, dont les coordonnées géographiques sont 4°19' de latitude Sud et 15°18' de longitude Est. Le climat est du type AW4 selon la classification de Köppen. C'est un climat tropical humide comportant deux saisons, une saison sèche de quatre mois qui va de mi-mai à mi-septembre et une saison pluvieuse de huit mois qui va de mi-septembre à mi-mai. La saison des pluies est entrecoupée d'une petite saison sèche entre mi-janvier et mi-février. La température moyenne annuelle est de 24,5 °C. Il y a trois saisons culturales dont la saison A qui va de mi-octobre à mi-février, la saison B de mi-février à mi-juin et la saison C de mi-juin à mi-octobre. La saison C ne concerne que les cultures de bas fonds. L'expérimentation a eu lieu pendant les saisons A et B. Les données sur les précipitations pendant la période expérimentale montrent deux périodes de sécheresse au mois de février (petite saison sèche) et au mois de juin (début de la grande saison sèche) (**Figure 1**). Ces deux périodes sèches correspondent chacune à la période de maturation du maïs pendant laquelle le besoin en eau par jour est de 3,5 mm au début, puis de moins en moins jusqu'à 0 mm à une semaine de la récolte.

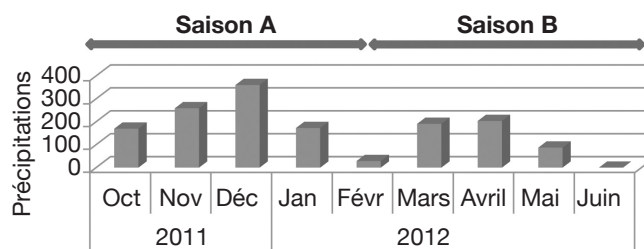


Figure 1. Relevé des précipitations pendant la période expérimentale — Rainfall amounts during the experimental period (CREN-K, 2013).

Culture test. Le maïs (*Zea mays* L.) en culture pure a été utilisé comme culture test pendant les deux campagnes culturales. C'est la céréale la plus cultivée en RDC et en régions tropicales d'Afrique centrale et orientale (Paliwal, 2002 ; Mpoiy, 2009). La culture est bien indiquée pour la saison A et accessoirement pour la saison B. Nous avons utilisé la variété QPM-SR, mise au point par l'Institut National pour l'Étude et la Recherche Agronomique (INERA) en collaboration avec l'Institut International pour l'Agriculture Tropicale (IITA). C'est une variété adaptée aux conditions éco-climatiques locales. Son cycle végétatif est de quatre mois avec un rendement moyen en grains secs de 800 kg·ha⁻¹ en milieu paysan.

Engrais minéral. L'engrais minéral utilisé a été le NPK 17-17-17. Il est presque le seul engrais composé disponible sur le marché et utilisé pour les cultures vivrières en RDC. La dose recommandée pour le sol expérimental, basé sur l'élément N, est de 706 kg·ha⁻¹ de NPK 17-17-17, soit 120 kg·ha⁻¹ d'unités fertilisantes (N₁₂₀ P₁₂₀ K₁₂₀) (Pieter et al., 2012). La composition réelle de l'engrais minéral utilisé, au regard de l'analyse faite au Laboratoire de pédologie-UNIKIN, est du NPK 17-20-19. Les quantités apportées en kg·ha⁻¹ sont présentées dans le **tableau 1**.

***Tithonia diversifolia*.** Le *Tithonia diversifolia* est une espèce rudérale invasive qui produit de grandes quantités de feuilles facilement décomposables et riches en éléments nutritifs (Nyasimi et al., 1997 ; Jama et al., 2000) (**Tableau 2**). Elle pousse spontanément aux alentours des maisons et des routes (Pieter et al., 2012). La quantité recommandée de feuilles de *T. diversifolia*

pour la culture de maïs dans le sol étudié est de 16 t·ha⁻¹ de matières fraîches (MF) (Pieter et al., 2012). On a apporté 7,2 kg (MF) sur 9 m², soit l'équivalent de 8 t·ha⁻¹ (MF) (moitié de la dose) du fait qu'il a été combiné à l'engrais minéral. Cette quantité équivaut à 1,84 t·ha⁻¹ de matières sèches (MS). La teneur en éléments minéraux de la matière sèche et les équivalences en kg·ha⁻¹ sont présentées dans le **tableau 2**.

Biochar. Le charbon de bois issu d'une plantation d'*Acacia mangium* de 7 ans a été utilisé comme amendement. Il a été broyé et tamisé pour obtenir des particules de dimensions inférieures à 2 mm. Sa teneur en carbone est de 49 % et son pH de 7,8. Nous avons utilisé 27 kg de biochar sur 9 m². Cette quantité équivaut à 30 t·ha⁻¹ de biochar, qui est la dose optimale recommandée pour les sols sableux de Kinshasa (Tomisa, 2011).

2.2. Méthodes

Dispositif et plan expérimental. Le dispositif expérimental était constitué de Blocs Complets Randomisés (BCR) avec des parcelles expérimentales de 3 m x 3 m, soit 9 m² (**Figure 2**). Nous avons au total quatre blocs avec chacun six traitements ou unités expérimentales.

Conduite expérimentale. Notre étude a été menée de mi-octobre 2011 à mi-juin 2012 au cours des saisons culturales A et B avec une expérience par saison. La préparation du terrain a commencé par le désherbage suivi d'un labour à 20 cm de profondeur et incorporation du biochar (T₂ et T₄) ou enfouissement

Tableau 1. Quantités d'engrais minéral apportées sur 9 m² (parcelle expérimentale) et rapportées par ha — *Quantities of mineral fertilizer on 9 m² (experimental plot) in kg·ha⁻¹*.

Traitements	Quantité apportée sur 9 m ² (kg)	Quantité par ha (kg·ha ⁻¹)	Quantités d'N, de P et de K contenues dans les différents apports (kg·ha ⁻¹)
T ₂ et T ₃	0,318	353	N ₆₀ P ₇₁ K ₆₇
T ₁ et T ₄	0,636	706	N ₁₂₀ P ₁₄₁ K ₁₃₄
T ₅	0,848	941	N ₁₆₀ P ₁₈₈ K ₁₇₉

T₁ : N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ ; T₂ : N₆₀ P₇₁ K₆₇ + biochar ; T₃ : N₆₀ P₇₁ K₆₇ + *Tithonia diversifolia* ; T₄ : N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ + biochar ; T₅ : N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉.

Tableau 2. Caractéristiques chimiques de *Tithonia diversifolia* (Lele, 2012) exprimées en % de matière sèche — *Chemical characteristics of Tithonia diversifolia (Lele, 2012), expressed in % of dry matter*.

Constituant chimique	Cot	Nt	C/N	P	K	Ca	Mg
Teneur en %	34,8	3,2	10,5	0,3	3,1	2,8	0,6
Quantité apportée en kg·ha ⁻¹	640,32	58,88		5,52	57,04	51,52	11,04

Cot : carbone organique total — *total organic carbon* ; Nt : azote total — *total nitrogen* ; C/N : rapport carbone sur azote — *report carbon on nitrogen*.

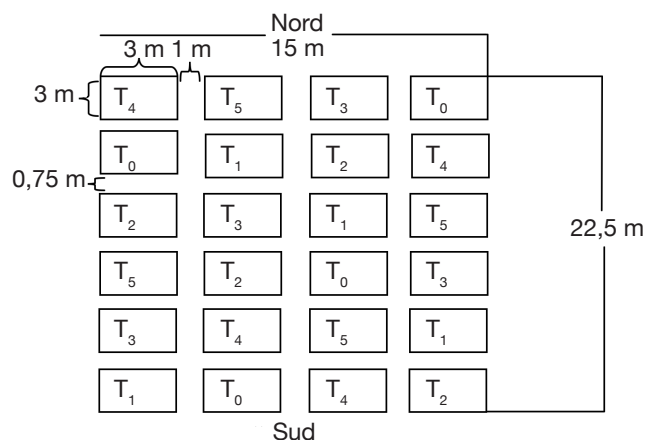


Figure 2. Le plan expérimental — *The experimental design.*

de feuilles de *Tithonia diversifolia* (T_3) deux semaines avant le semis pour une meilleure décomposition. L'engrais minéral a été épandu, sur toute la parcelle, en une seule fois, trois jours avant le semis. Le maïs a été semé avec un écartement de 0,5 m x 0,5 m et une densité de 40000 plantes·ha⁻¹, à raison de deux graines par poquet. Nous avons au total sept lignes avec sept pieds par ligne pour un total de 49 pieds de maïs par unité expérimentale. Les soins apportés étaient le démariage 15 jours après la levée, le sarclage et binage deux fois par campagne culturale.

Après la récolte, une nouvelle culture de maïs a été installée sans apport de fertilisants ni d'amendement en vue d'évaluer les effets résiduels des traitements appliqués pendant la première campagne culturale.

Évaluation du rendement en biomasse et en grains.

Pour les deux campagnes culturales, le rendement en biomasse et en grains secs a été évalué sur les cinq lignes internes de la parcelle expérimentale, c'est-à-dire en laissant les lignes de bordures. À la récolte, un petit échantillon de la biomasse était récolté, mis à l'étuve à 105 °C pendant 24 h pour déterminer le taux de matière sèche. Le rendement en biomasse n'est pas présenté dans cet article. Les épis étaient séchés sur une toile dans un hangar pendant deux semaines puis pesés, ensuite égrainés avant le pesage des grains.

Échantillonnage et analyse du sol.

Avant l'expérience, neuf prélèvements de sol ont été effectués à la profondeur de 0 à 20 cm, suivant la méthode des diagonales, puis mélangés pour constituer un seul échantillon composite. À la fin de l'expérience, nous avons prélevé des échantillons de sol dans chaque traitement de chaque bloc selon la même méthode. Les prélèvements ont ensuite été mélangés pour constituer des échantillons composites. Ces échantillons ont été analysés pour déterminer la

texture (% fraction sableuse, limoneuse et argileuse), le pH, le carbone organique total, l'azote total, les cations échangeables (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+), le phosphore assimilable, la capacité d'échange cationique (CEC) du sol et la saturation en aluminium échangeable. Ces analyses ont été effectuées au Laboratoire de Pédologie de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa en RDC, selon les méthodes décrites par Anderson et al. (1993) et Buondonno et al. (1995).

Analyse des éléments mobilisés par le maïs.

L'analyse a concerné la totalité de la partie aérienne (biomasse aérienne, carotte et grains). Au moment de la récolte, la biomasse (tiges et feuilles) des cinq lignes internes de la parcelle était isolée des épis, puis coupée et pesée. Un échantillon représentatif de 500 g était prélevé et séché à l'étuve à 65 °C. Un broyage fin à 500 µm était par la suite effectué avant l'analyse. Les carottes et grains du maïs étaient également broyés à la même granulométrie et soumis aux analyses. Les analyses ont porté sur les éléments majeurs dont le N, P, K, Ca et Mg. Les quantités d'éléments obtenues ont été multipliées par le rendement de chaque organe pour chaque traitement pendant les deux campagnes culturales. L'azote dans la biomasse végétale a été analysé selon la méthode Kjeldahl. La détermination des autres éléments (P, K, Ca, Mg) a été effectuée après une minéralisation de l'échantillon dans un mélange d'acide perchlorique 5 % et d'acide nitrique 4 % à proportion égale, suivi d'une reprise à l'acide chlorhydrique 10 %. Le volume issu de la minéralisation était filtré sur papier filtre Whatman Schleider et Schuell 602 H ½. Le dosage des éléments dans les minéralisats dilués a été réalisé au colorimètre dans le bleu de molybdate d'ammonium à la longueur d'onde de 880 nm pour le P et au spectrophotomètre par absorption atomique pour le Ca et Mg et par émission pour K.

Détermination du coefficient apparent d'utilisation.

Le coefficient apparent d'utilisation d'un élément fertilisant est le rapport du supplément d'élément fertilisant prélevé par une culture fertilisée comparativement à la même culture non fertilisée à la quantité de cet élément apportée par la fertilisation (Ruganzu, 2009). Ce coefficient représente la part de l'élément provenant du fertilisant apparemment prélevé par la culture. Il a été déterminé pour les éléments

$$CAU (\%) = \frac{\text{Exp (fertilisant en kg}\cdot\text{ha}^{-1}) - \text{Exp (témoin en kg}\cdot\text{ha}^{-1})}{\text{Quantité de fertilisant apportée en kg}\cdot\text{ha}^{-1}} \times 100$$

analysés dans les organes de la culture du maïs (N, P, K), selon la relation :

avec Exp = exportations (elles concernent les quantités

d'éléments N, P, K exportées pendant les deux campagnes culturales).

Calcul de l'indice d'acceptabilité des différents traitements. L'indice d'acceptabilité (IA) a été calculé pour identifier le meilleur traitement facilement adoptable par les cultivateurs. Cet indice est le rapport entre le bénéfice brut des nouveaux traitements et le bénéfice brut du traitement témoin (Jama et al., 2000 ; Muna-Mucheru et al., 2007). Le bénéfice brut est le bénéfice non amputé de charges fixes, c'est-à-dire les charges qui sont les mêmes pour tous les traitements. Ces charges concernent la préparation du terrain, le semis du maïs et les sarclages. Ainsi, une technologie ne peut être facilement adoptée que si la valeur de l'IA est égale ou supérieure à 2 (Muna-Mucheru et al., 2007 ; Kaho et al., 2011). Selon les mêmes sources, l'adoption se ferait avec réticence si cette valeur était entre 1,5 et 2 et, en-dessous de 1,5, il y a rejet. Les charges variables ont concerné le prix des engrais chimiques (100 \$·50 kg⁻¹). Le prix de la production et de l'incorporation du biochar dans le sol est de (53,33 \$·t⁻¹). Le cout du biochar a été amorti (amortissement constant) sur 25 ans (temps minimum pendant lequel le biochar agit dans le sol [Lehman et al., 2006]). Après l'amortissement, nous avons obtenu le cout de 2,13 \$·t⁻¹·an⁻¹. Ce cout a été rapporté sur les huit mois de la période expérimentale. Le cout de la main-d'œuvre pour collecter, transporter et incorporer les feuilles de *T. diversifolia* dans le sol est celui calculé par Pieter et al. (2012) qui est d'environ 5 \$·100 kg⁻¹ de feuilles de *T. diversifolia*. Le prix moyen de la tonne de maïs pendant la période expérimentale, sur le marché, a été de 900 \$.

Analyse statistique. Pour l'analyse des données, nous avons recouru à l'analyse de la variance générale au seuil de probabilité de 5 % à l'aide du logiciel GenStat. Ensuite, nous avons procédé au test des comparaisons multiples (LSD) pour préciser les différences entre les traitements.

3. RÉSULTATS

3.1. Propriétés du sol au début et à la fin de l'expérimentation

Les résultats sur les propriétés physiques et chimiques du sol au début et à la fin de l'expérimentation, l'analyse de la variance et le test de comparaisons de moyennes sont repris dans le **tableau 3**. Les propriétés du sol à la fin de l'expérimentation sont présentées en rapport avec les différents traitements. Le sol est sableux et acide (pH = 5,18) au début de l'expérimentation. Les teneurs en éléments nutritifs sont faibles (N : 0,051 %,

P : 12,7 mg·kg⁻¹, K : 0,03 Cmol·kg⁻¹, Ca : 0,38 Cmol·kg⁻¹, Mg : 0,12 Cmol·kg⁻¹ et CEC : 3,7 Cmol·kg⁻¹). La saturation en aluminium est très élevée (73 %). Après deux campagnes culturales, des changements sont observés sur les propriétés chimiques des sols (**Tableau 3**). Le pH de sols sous différents traitements a baissé (pH < 5) par rapport au sol initial (pH > 5), sauf pour les sols amendés au biochar (T₂ et T₄) pour lesquels le pH a augmenté (pH > 6) (**Tableau 3**). La plus petite valeur du pH a été observée dans le traitement au *T. diversifolia* (T₃) (pH = 4,12). La teneur en C a augmenté dans les sols traités au biochar (T₂ [2,25 %] et T₄ [2,34 %]) et au *T. diversifolia* (T₃ [1,52%]) par rapport au sol initial (0,98 %). Dans les traitements (T₀, T₁ et T₅), les teneurs en carbone sont similaires à celles du sol initial au seuil de probabilité de 5 %. La teneur en N a diminué dans les traitements T₀ (0,015 %), T₁ (0,027 %), T₂ (0,028 %) et T₅ (0,031 %), alors que dans les traitements T₃ (*T. diversifolia*) et T₄ (biochar + N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄), les teneurs sont les mêmes que celles du sol initial (0,051 %) au seuil de probabilité de 5 %. La plus petite teneur en azote a été observée dans le traitement témoin (0,015 %). La teneur en P assimilable a baissé dans les traitements T₀ (7,43 mg·kg⁻¹), T₁ (10,4 mg·kg⁻¹) et T₅ (10,5 mg·kg⁻¹), alors qu'elle a augmenté dans les traitements avec le biochar T₂ (13,8 mg·kg⁻¹) et T₄ (19,2 mg·kg⁻¹) par rapport au sol initial (12,7 mg·kg⁻¹). Dans le traitement au *T. diversifolia* (T₃), la teneur en P (11,9 mg·kg⁻¹) est la même que celle du sol initial au seuil de probabilité de 5 %. La teneur en K a baissé seulement dans le sol témoin T₀ (0,01 cmol·kg⁻¹), alors qu'elle a augmenté dans les traitements T₄ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ + biochar [0,093 Cmol·kg⁻¹]), T₂ (N₆₀ P₇₁ K₆₇ + biochar [0,04 Cmol·kg⁻¹]), T₃ (N₆₀ P₇₁ K₆₇ + *T. diversifolia* [0,056 Cmol·kg⁻¹]) et T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉ [0,04 Cmol·kg⁻¹]). Dans le traitement T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ [0,02 Cmol·kg⁻¹]), la teneur est la même que dans le sol initial au seuil de probabilité de 5 %. La teneur en Ca dans les traitements T₀ (0,11 Cmol·kg⁻¹), T₁ (0,13 Cmol·kg⁻¹) et T₅ (0,14 Cmol·kg⁻¹) a diminué, alors que dans les traitements au *T. diversifolia* (T₃) et au biochar (T₂ et T₄), elle est égale à celle du sol initial (0,38 Cmol·kg⁻¹) au seuil de probabilité de 5 %. La plus petite quantité de Ca a été obtenue avec le traitement témoin (0,11 Cmol·kg⁻¹). La teneur en magnésium (Mg) a diminué dans les sols sous différents traitements. La plus petite teneur en Mg a été observée dans le traitement témoin (0,03 Cmol·kg⁻¹). La capacité d'échange cationique a diminué dans les traitements (T₀, T₁ et T₅) et a augmenté dans ceux au biochar (T₂ [14,88 Cmol·kg⁻¹] et T₄ [14,47 Cmol·kg⁻¹]) et au *T. diversifolia* (T₃ [11,3 Cmol·kg⁻¹]). Les plus faibles CEC ont été obtenues avec les traitements témoin (2,4 Cmol·kg⁻¹) et T₁ (2,73 Cmol·kg⁻¹). La saturation en aluminium (mAl) a augmenté seulement dans le traitement témoin (T₀ = 80 %), alors qu'elle a baissé dans les traitements T₄, T₂ et T₃. Dans

Tableau 3. Composition granulométrique et chimique du sol expérimental avant et après l'expérience et analyse de la variance (AV) — Chemical composition and particle size of the test soil before and after the experiment and analysis of variance (AV).

Traitement	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	pH eau	Carbone (%)	N (%)	P (mg.kg ⁻¹)	K (cmol.kg ⁻¹)	Ca (cmol.kg ⁻¹)	Mg (cmol.kg ⁻¹)	CEC (cmol.kg ⁻¹)	mAl (%)
Avant	4,68	6,25	89,1	5,18 ^b	0,98 ^c	0,051 ^a	12,7 ^{bc}	0,03 ^{cd}	0,38 ^a	0,12 ^a	3,7 ^c	73 ^{ab}
Après												
T ₀	4,66	6,17	89,1	4,82 ^c	0,83 ^c	0,015 ^c	7,43 ^d	0,01 ^d	0,11 ^b	0,03 ^c	2,4 ^d	80 ^a
T ₁	4,68	6,24	89,0	4,86 ^c	0,90 ^c	0,027 ^b	10,4 ^c	0,02 ^{cd}	0,13 ^b	0,043 ^c	2,73 ^d	77,6 ^{ab}
T ₂	4,77	6,25	88,9	6,07 ^a	2,25 ^a	0,028 ^b	13,8 ^b	0,04 ^{bc}	0,30 ^a	0,083 ^b	14,88 ^a	46,6 ^c
T ₃	4,72	6,34	88,9	4,12 ^d	1,52 ^b	0,044 ^a	11,9 ^{bc}	0,06 ^b	0,40 ^a	0,11 ^{ab}	11,3 ^b	69,6 ^b
T ₄	4,65	6,28	89,0	6,13 ^a	2,34 ^a	0,042 ^a	19,2 ^a	0,09 ^a	0,31 ^a	0,106 ^{ab}	14,47 ^a	44,6 ^c
T ₅	4,59	6,22	89,1	4,87 ^c	0,88 ^c	0,031 ^b	10,5 ^c	0,04 ^{bc}	0,14 ^b	0,046 ^c	2,8 ^{cd}	73,6 ^{ab}
SP	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
p-value				0,000	0,000	0,006	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,000	0,0003
CV				2,07	19,08	22,03	12,18	29,29	23,53	23,57	6,99	7,85

T₀ : témoin — control ; T₁ : N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ ; T₂ : N₆₀ P₇₁ K₆₇ + biochar ; T₃ : N₆₀ P₇₁ K₆₇ + *Tithonia diversifolia* ; T₄ : N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ + biochar ; T₅ : N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉ ; SP : seuil de signification — significance level ; CV : coefficient de variation — coefficient of variation ; CEC : capacité d'échange cationique — cation exchange capacity ; mAl : saturation en aluminium — aluminium saturation ; les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas différentes au seuil de probabilité de 5 % — means followed by the same letter are not different at probability level of 5%.

les traitements T₅ et T₁, la mAl est la même que dans le sol initial au seuil de probabilité de 5 %. Les plus petites valeurs de la mAl ont été obtenues avec les traitements au biochar (T₂ [46,6 %] et T₄ [44,6 %]). L'ordre décroissant d'amélioration des propriétés chimiques du sol est : T₄ ([N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄] + biochar) > T₂ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + biochar) > T₃ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + *T. diversifolia*) > T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉) = T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄) = T₀ (Témoin).

3.2. Rendement en grains de maïs

Les résultats sur les rendements en grains de maïs, l'analyse de la variance et le test de comparaisons des moyennes (LSD) de deux campagnes culturales sont illustrés par la **figure 3**. Il ressort de l'analyse de la variance (AV) que des différences hautement significatives ($p = 0,000$) de rendements ont été observées entre les traitements au seuil de probabilité de 5 %. À la première campagne, le rendement le plus élevé a été obtenu avec le T₄ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ + biochar [3 200 kg·ha⁻¹]), alors que le témoin (T₀) a donné le plus faible rendement (700 kg·ha⁻¹). À la deuxième campagne, le T₃ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + *T. diversifolia*) a donné le rendement le plus élevé (2210 kg·ha⁻¹) et le rendement du témoin (T₀ [506,7 kg·ha⁻¹]) est resté le plus bas. Une baisse des rendements en grains de maïs a été observée sous différents traitements entre la première et la deuxième campagne culturale. La somme des rendements des deux campagnes nous a donné le classement suivant de traitement selon leur influence positive : T₄ ([N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄] + biochar) > T₃ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + *T. diversifolia*) > T₂ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + biochar) > T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉) > T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄) > T₀.

3.3. Quantités d'éléments minéraux exportées

Le **tableau 4** présente les quantités d'éléments minéraux (N, P, K, Ca, Mg) exportées par la culture de maïs au cours de deux campagnes culturales en fonction des traitements. Les exportations les plus élevées ont été obtenues avec les traitements T₄ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ + biochar [N : 168,3 kg·ha⁻¹, P : 35,1 kg·ha⁻¹, K : 134,5 kg·ha⁻¹, Ca : 43,7 kg·ha⁻¹, Mg : 24,8 kg·ha⁻¹]) et T₃ (N₆₀ P₇₁ K₆₇) + *T. diversifolia* [N : 178,8 kg·ha⁻¹, P : 15,4 kg·ha⁻¹, K : 112,4 kg·ha⁻¹, Ca : 61,4 kg·ha⁻¹, Mg : 29,8 kg·ha⁻¹]), alors que le témoin a exporté (N : 44,5 kg·ha⁻¹, P : 4,9 kg·ha⁻¹, K : 21,6 kg·ha⁻¹, Ca : 8,7 kg·ha⁻¹, Mg : 4,7 kg·ha⁻¹) le

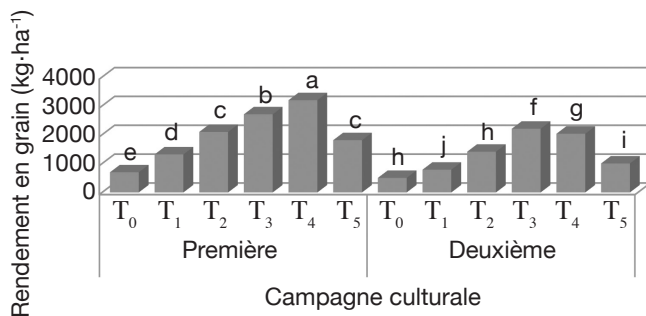


Figure 3. Rendement en grain de maïs pendant les deux campagnes culturales en kg·ha⁻¹ (MS) — *Yield of maize grain during the two crop seasons in kg·ha⁻¹ (DM).*

Signification des traitements — *meaning of the treatments* : voir **tableau 3** — *see table 3* ; les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas différentes au seuil de probabilité de 5 % — *Means followed by the same letter are not different at probability level of 5%.*

moins d'éléments. Les quantités d'éléments exportées au cours de la première campagne sont supérieures à celles exportées lors de la deuxième campagne (**Tableau 4**). Conformément aux rendements en biomasse et en grains, les exportations de deux campagnes se classent selon l'ordre décroissant : T₄ ([N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄] + biochar) > T₃ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + *T. diversifolia*) > T₂ ([N₆₀ P₇₁ K₆₇] + biochar) > T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉) > T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄) > T₀.

Tableau 4. Quantités d'éléments exportés par la culture du maïs en fonction des traitements au cours de la première et de la deuxième saison (en kg·ha⁻¹ de matière sèche) — *Quantities of mineral elements exported by growing maize based on the treatments during the first and the second season (in kg·ha⁻¹ of dry matter).*

Campagne culturale	Élément	Traitement					
		T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Campagne 1	N	27,3	40,5	67,5	94,4	99,5	88,7
	P	3,2	7,9	18,5	10,8	21,2	11,9
	K	12,4	34,5	45,4	82,9	84,7	29,8
	Ca	5,8	10,5	12,4	49,5	32,5	11,5
	Mg	2,9	3,4	7,5	22,9	18,1	7,5
Campagne 2	N	17,2	29,4	41,7	81,4	68,8	49,8
	P	1,7	3,8	5,6	4,6	13,9	4,1
	K	9,2	17,2	34,8	29,5	49,8	17,3
	Ca	2,9	5,9	9,3	11,9	11,2	5,8
	Mg	1,8	2,3	3,5	6,9	6,7	2,5
Total des exportations des deux campagnes	N	44,5	69,9	109,2	175,8	168,3	138,5
	P	4,9	11,7	24,1	15,4	35,1	16,0
	K	21,6	51,7	80,2	112,4	134,5	47,1
	Ca	8,7	16,4	21,7	61,4	43,7	17,3
	Mg	4,7	5,7	11,0	29,8	24,8	10,0

Signification des traitements — *meaning of the treatments* : voir **tableau 3** — *see table 3*.

3.4. Coefficient apparent d'utilisation des éléments minéraux

Le **tableau 5** présente le coefficient apparent d'utilisation des éléments minéraux (N, P, K) par la culture de maïs, en fonction des traitements, pendant les deux campagnes culturales. Le coefficient apparent d'utilisation (CAU) le plus élevé pour l'N a été observé dans le traitement T₃ (N₆₀ P₇₁ K₆₇ + *T. diversifolia* [N : 110,4 %]), alors que pour le P et le K, le traitement T₂ (N₆₀ P₇₁ K₆₇ + biochar [P : 27,04 % et K : 87,5 %]) a donné les plus grands CAU (**Tableau 5**). Les taux les plus faibles d'utilisation d'éléments N, P, K ont

Tableau 5. Valeurs du coefficient apparent d'utilisation pour les éléments N, P, K en fonction des traitements (en %) pour les deux saisons — *Values of the apparent coefficient of use for the elements N, P, K based on the treatments (in %) during the two seasons.*

Élément	Traitement				
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
N	21,1	107,8	110,4	103,2	58,75
P	4,8	27,04	13,7	21,4	5,9
K	22,5	87,5	73,2	84,3	14,2

Signification des traitements — *meaning of the treatments* : voir **tableau 3** — *see table 3*.

été obtenus avec les traitements à l'engrais minéral T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ [N : 21,1 %, P : 4,8 %, K : 22,5 %]) et T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉ [N : 58,75, P : 5,9, K : 14,2]).

3.5. Indice d'acceptabilité des différents traitements

Les valeurs des indices d'acceptabilité (IA) des différents traitements ainsi que celles des variables qui ont servi à leurs calculs sont présentés dans le **tableau 6**. Ces valeurs montrent que les IA obtenus avec les traitements à l'engrais minéral (NPK) T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄ [IA : 0,45]) et T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉ [IA : 0,6]) sont inférieurs à 1, alors que ceux obtenus avec les traitements au biochar (T₂ [IA : 2,14] et T₄ [IA : 2,92]) et au *T. diversifolia* T₃ (IA : 3,09) sont supérieurs à 2.

4. DISCUSSION

4.1. Propriétés du sol au début de l'expérimentation

La texture sableuse du sol expérimental laisse présager une pénétration facile des racines. Cependant, la rétention de l'eau et des éléments minéraux constitueraient dans ce cas une contrainte pour une production agricole soutenue. Des textures semblables ont été également trouvées par Koy (2010) et Mulaji (2011) pour les sols de Kinshasa. Ces auteurs ont montré que la fraction sableuse de ce sol est dominée par le quartz. Le caractère acide de ce sol implique une forte rétention du phosphore car le phosphate se combine au fer et à l'aluminium pour former des composés très peu solubles et donc peu disponibles pour les plantes (Dabin, 1963 ; Kadiata et al., 2003). Ceci serait la cause principale de la faible teneur en phosphore assimilable dans le sol expérimental (**Tableau 3**). Les teneurs en éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg), en C et la CEC sont très faibles comparativement aux valeurs tests proposées par Landon (1991) pour les sols tropicaux.

Le rapport C/N est élevé (19,2). Ce rapport s'écarte de la zone de 10-14, considérée comme optimale pour des besoins agronomiques (Aubert et al., 1966 ; Holland et al., 1992 ; Van Engelen et al., 2006). Ceci indique aussi que la matière organique est de mauvaise qualité dans ce sol (Van Engelen et al., 2006). La très faible CEC est une indication que ce sol contient de faibles réserves d'éléments nutritifs (**Tableau 3**). Cette très faible CEC est due à la minéralogie du sol dont la fraction argileuse, très faible, est dominée par la kaolinite (phyllosilicate 1:1) avec des hydroxydes/oxydes résiduels d'Al (Al(OH)₃) (Baert et al., 2009 ; Koy, 2010) et à la faible teneur en matière organique (**Tableau 3**). La saturation en aluminium (73 %) est largement supérieure à la limite tolérable pour la plupart des cultures car selon Boyer (1976) et Landon (1991), les sols saturés à plus de 60 % d'Al⁺³ présentent une toxicité aluminique considérable.

4.2. Effet de différents traitements sur les propriétés du sol

La baisse du pH dans les sols non amendés au biochar serait due aux exportations des cations basiques tels que le Ca⁺² et le Mg⁺², ainsi qu'à leur remplacement par l'Al⁺³ et l'H⁺ dans le complexe absorbant. Ceci se justifie par l'augmentation de la saturation en aluminium dans le complexe absorbant (T₀, T₁, T₃, T₅) (**Tableau 3**). La plus grande baisse du pH dans le sol traité au *T. diversifolia* (**Tableau 3**) serait accentuée par la présence des anions acides NO₃⁻ et SO₄⁻² provenant de la décomposition de ses feuilles (Ruganzu, 2009). Des baisses analogues de pH avec l'apport des feuilles de *T. diversifolia* ont été également observées par Kaho et al. (2011) au Cameroun et Ruganzu (2009) au Rwanda. L'augmentation du pH dans les sols amendés au biochar est principalement due au pH initial du biochar qui était de 7,8. Cette augmentation a eu un effet sur la réduction de la saturation en Al (**Tableau 3**). Ceci confirme les expériences de Lehmann et al. (2009) et de Schulz et al. (2012) qui ont montré que

Tableau 6. Indice d'acceptabilité (IA) des différents traitements — *Acceptability index (IA) of the different treatments.*

Traitement	Cout du NPK (\$·ha ⁻¹)	Cout du biochar (\$·ha ⁻¹)	Cout de <i>Tithonia diversifolia</i> (\$·ha ⁻¹)	Rendement maïs (kg·ha ⁻¹)	Revenu brut maïs (\$·ha ⁻¹)	Bénéfice brut maïs (\$·ha ⁻¹)	IA
T ₀	0	0	0	1 206,7	1 086	1 086	
T ₁	1 411,7	0	0	2 110	1 899	487,3	0,45
T ₂	706,3	42,6	0	3 513,3	3 162	2 328,5	2,14
T ₃	706,3	0	400	4 920	4 428	3 321,7	3,06
T ₄	1 411,7	42,6	0	5 236,7	4 713	3 174,1	2,92
T ₅	1 884,4	0	0	2 820	2 538	653,6	0,60

Signification des traitements — *meaning of the treatments* : voir **tableau 3** — *see table 3*.

le biochar réduit le taux d'aluminium biodisponible et l'acidité des sols tropicaux. Le changement significatif du pH dans le sol sous biochar a eu des effets positifs sur la disponibilité de P (**Tableau 3**) car dans les sols tropicaux, le P est bloqué au pH inférieur à 6 et il est disponible pour des pH compris entre 6 et 8 (Zhang et al., 2010). L'augmentation de la teneur en Ca dans le sol traité au *T. diversifolia* (T_3) est due à la grande teneur en Ca contenue dans ses feuilles (**Tableau 2**). La diminution de la teneur en Mg dans tous les sols par rapport au sol initial est due aux exportations (**Tableau 4**) et aux lixiviations (Schulz et al., 2012). L'augmentation de la CEC dans les sols traités au biochar et aux feuilles de *T. diversifolia* (T_2 , T_3 et T_4) est en relation avec la teneur en carbone (**Tableau 3**). Des augmentations similaires de la CEC ont été également obtenues dans les sols tropicaux au Brésil avec l'apport du biochar combiné au compost par Schulz et al. (2012) et l'apport simple du biochar par Schulz et al. (2013). Aussi, une disponibilité suffisante en carbone, apportée par le biochar et les feuilles de *T. diversifolia*, stimulerait l'activité biologique du sol en améliorant par là le cycle de l'azote, avec une moindre lixiviation des nitrates (Steiner et al., 2007 ; Lehman et al., 2009 ; Major et al., 2010 ; Zhang et al., 2010). Les valeurs de la saturation en aluminium du complexe absorbant sont en relation inverse avec celles du pH (**Tableau 3**).

4.3. Effet de différents traitements sur le rendement en grains du maïs

Le faible rendement obtenu avec les feuilles de *T. diversifolia* (T_3) pendant la première campagne, par rapport au rendement sous biochar T_4 ($[N_{120} P_{141} K_{134}] + \text{biochar}$), résulterait de la libération lente des nutriments dont la fourniture dans le sol n'est pas synchronisée avec les besoins de la plante. Ceci justifie le meilleur rendement obtenu avec le traitement contenant les feuilles de *T. diversifolia*, par rapport aux autres traitements, à la deuxième campagne (**Figure 3**). La baisse des rendements en grains de maïs observée sous différents traitements entre la première et la deuxième campagne est due à l'appauvrissement du sol en éléments nutritifs suite aux exportations. Le rendement de 700 kg·ha⁻¹ obtenu avec le maïs témoin (T_0) à la première campagne est largement inférieur à celui attendu (1000-1800 kg·ha⁻¹) pour la variété QPM-SR (Ministère de l'Agriculture de la RDC, 2008). Ceci confirme que le sol expérimental est très peu fertile. Cette faible fertilité n'a pas permis à la variété utilisée, bien qu'adaptée dans le milieu, d'exprimer ses potentialités, conformément aux résultats de Violic (2002) et Pixley (2003). Toutefois, ce rendement reste dans la gamme de ceux obtenus en milieu paysan en RDC (entre 700 à 900 kg·ha⁻¹). À la deuxième campagne culturale, le rendement avec le

témoin (506,7 kg·ha⁻¹) est descendu en-dessous de ceux obtenus en milieu paysan. Pour la même dose d'engrais minéral appliquée, le T_1 ($[N_{120} P_{141} K_{134}]$) comparé au T_4 ($[N_{120} P_{141} K_{134}] + \text{biochar}$), l'amendement du sol au biochar a permis de tripler le rendement en grains pendant les deux saisons culturales. Cette augmentation de rendement provient de l'amélioration des propriétés du sol dont particulièrement la CEC et le pH. Les rendements obtenus avec le traitement T_4 ($[N_{120} P_{141} K_{134}] + \text{biochar}$) respectivement à la première campagne (3200 kg·ha⁻¹) et à la deuxième campagne (2036,7 kg·ha⁻¹) montrent qu'avec l'usage du biochar combiné à l'engrais minéral, on peut quadrupler le rendement en grains de maïs pendant deux campagnes culturales (**Figure 3**) dans les conditions expérimentales. Des résultats similaires ont été également obtenus par Lui et al. (2012) sur la culture de maïs avec l'apport du biochar combiné au compost dans un sol sablonneux d'Allemagne. Le rendement obtenu avec les feuilles de *T. diversifolia* combiné à l'engrais minéral (2700 kg·ha⁻¹) à la première campagne est proche de celui obtenu par Ruganzu (2009) (2600 kg·ha⁻¹) avec l'utilisation simple de 2,1 t·ha⁻¹ de feuilles de *T. diversifolia*.

4.4. Analyse des exportations et du coefficient apparent d'utilisation des éléments minéraux

Les valeurs des exportations sont corrélées positivement avec celles de rendements en grains de maïs. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Ruganzu (2009) au Rwanda sur un sol argileux. L'absorption plus importante de N aurait été favorisée par le besoin de la culture en cet élément. L'azote joue un rôle essentiel dans le développement des cultures, en particulier les céréales (Hodge, 2005). Bertrand et al. (2000) montrent que les céréales peuvent exporter de grandes quantités d'éléments minéraux, dont particulièrement l'azote et le potassium. Pour les cations, l'absorption est plus rapide pour les monovalents que pour les divalents (Fageria et al., 2005 ; Petit et al., 2005).

La variabilité dans l'utilisation des éléments observée dépend des conditions biophysiques (Kimetu et al., 2006) et climatiques prévalentes (Laudelout, 1954). Ainsi, en comparaison avec les traitements au NPK (T_1 et T_3), la plus grande utilisation des éléments avec les traitements contenant le biochar et les feuilles de *T. diversifolia* serait due à l'amélioration des propriétés du sol, dont la CEC (**Tableau 3**). Lui et al. (2012) ont montré que l'apport du biochar multiplie l'utilisation des éléments K et P par des facteurs 2,5 et 1,2, respectivement, par rapport au sol témoin. De ce fait, on peut établir une relation positive entre l'amélioration des propriétés du sol, l'utilisation des éléments minéraux et la production en grains de la culture. La grande utilisation des éléments par la culture sous le traitement avec *T. diversifolia* serait

également liée à la qualité de la biomasse qui favorise la disponibilité des nutriments et la croissance de la plante (Gachengo et al., 1999). Les taux de CAU obtenus après l'application de NPK T₁ (N₁₂₀ P₁₄₁ K₁₃₄) et T₅ (N₁₆₀ P₁₈₈ K₁₇₉) (**Tableau 5**) sont proches de ceux obtenus par Ruganzu (2009) à Rubona au Rwanda (N : 33,1 ; P : 9 et K : 29) sur un sol argileux et avec l'application N₇₅ P₇₅ K₇₅ kg·ha⁻¹.

4.5. Choix des traitements à diffuser en fonction de l'indice d'acceptabilité

En fonction de l'indice d'acceptabilité (IA), les traitements T₃ (IA = 3,06), T₄ (IA = 2,92) et T₂ (IA = 2,14) peuvent être diffusés aux paysans avec plus de facilité (**Tableau 6**). Du fait que l'effet du biochar peut se manifester durant 50 ans (Lehman et al., 2006) et compte tenu de la moindre disponibilité du *T. diversifolia*, le choix pourrait être porté sur le traitement contenant le biochar (T₂ et T₄). Toutefois, le choix entre les deux traitements pourrait se faire aussi en fonction de la disponibilité de chaque intrant. L'IA trouvé avec le *T. diversifolia* est proche de celui trouvé par Kaho et al. (2011) (IA : 2,53 et 2,65) sur un sol ferrallitique argileux du Centre du Cameroun.

5. CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude ont montré que le biochar et les feuilles de *T. diversifolia* combinés à l'engrais minéral ont augmenté la teneur en carbone, en potassium et la CEC du sol étudié, ainsi que les rendements en grains, les exportations et le coefficient apparent d'utilisation des éléments par le maïs pendant deux campagnes culturales. Le biochar, comme amendement, a en outre réduit l'acidité et la saturation du sol en aluminium avec un effet sur l'amélioration de la disponibilité du P. L'application des feuilles de *T. diversifolia* a augmenté la teneur en calcium du sol expérimental. Au regard de l'indice d'acceptabilité, les traitements avec du biochar T₂ (IA = 2,14) et T₄ (IA = 2,92) et celui avec les feuilles de *T. diversifolia* T₃ (IA = 3,06) peuvent être acceptés par les agriculteurs avec plus de facilité.

Remerciements

Nous remercions l'ERAIFT (École Régionale Post Universitaire d'Aménagement et de Gestion Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux) et la WBI (Wallonie- Bruxelles International) pour avoir financé cette étude.

Bibliographie

Adjei-Nsiah S. et al., 2007. Evaluating sustainable and profitable cropping sequences with cassava and four

- legume crops: effects on soil fertility and maize yields in the forest/savannah transitional agroecological zone of Ghana. *Field Crops Res.*, **103**, 87-97.
- Anderson J.M. & Ingram J.S., 1993. *Tropical soil biology and fertility: handbook of methods*. 2nd edition. Wallingford, UK: CAB International.
- Aubert G. & Segalen P., 1966. Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM Ser. Pédol.*, **4**(4), 97-112.
- Baert G. et al., 2009. *Guide des sols en République Démocratique du Congo. Description et données physico-chimiques de profils types*. Gent, Belgique : Universiteit Gent.
- Bertrand R. & Gigou J., 2000. *La fertilité des sols tropicaux*. Paris : Maisonneuve et Larousse.
- Boyer J., 1976. L'aluminium échangeable : incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM*, **14**(4), 259-269.
- Buondonno H.O., Rashad A.A. & Coppola E., 1995. Comparing tests for soil fertility: the hydrogen peroxide/sulphuric acid treatment as an alternative to the copper/selenium catalysed digestion process for routine determination of soil nitrogen-Kjeldahl. *Communication Soil Sci. Plant Anal.*, **26**, 1607-1619.
- Chianu J.N., Akintola J.O. & Kormawa P.M., 2002. Profitability of cassava-maize production under different fallow systems and land-use intensities in the derived savanna of southwest Nigeria. *Exp. Agric.*, **38**, 51-63.
- CREN-K (Centre Régional d'Études Nucléaires de Kinshasa), 2013. *Données météorologiques du Mont Amba*. Kinshasa : station météorologique du CREN-K.
- Dabin B., 1963. Appréciation des besoins en phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM*, **3**, 27-42.
- Dabin B., 1984. Les sols acides tropicaux. *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol.*, **21**, 7-19.
- Fageria N. & Baligar V., 2005. Nutrient availability. In: Hillel D., ed. *Encyclopedia of soils in the environment*. Vol. 3. Elsevier Academic Press, 63-71.
- Gachengo C., Palm C., Jama B. & Othieno C., 1999. *Tithonia* and *Senna* green manures and inorganic fertilizers as phosphorus sources for maize in Western Kenya. *Agrofor. Syst.*, **44**, 21-36.
- Hodge A., 2005. Plant uptake. In: Hillel D., ed. *Encyclopedia of soils in the environment*. Vol. 3. Elsevier Academic Press, 39-46.
- Holland M.D. et al., 1992. *Natural and human resource studies and land use options, Department of Nyong and So'o, Cameroon*. Chatham, UK: Natural Resources Institute.
- Jama B. et al., 2000. *Tithonia* as a green manure for soil fertility improvement in Western Kenya: a review. *Agrofor. Syst.*, **49**, 201-221.
- Kadiata B.D. & Lumpungu K., 2003. Differential phosphorus uptake and use efficiency among selected nitrogen-fixing tree legumes over time. *J. Plant Nutr.*, **26**, 1009-1022.
- Kaho F., Yemefack M., Feujio-Teguefonet P. & Tchanchaouang J.C., 2011. Effet combiné des feuilles de *Tithonia diversifolia* et des engrais inorganiques sur les

- rendements du maïs et les propriétés d'un sol ferrallitique au Centre Cameroun. *Tropicicultura*, **29**(1), 39-45.
- Kimetu J.M. et al., 2006. Partial balance of nitrogen in a maize cropping system in humic nitisol of Central Kenya. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, **76**, 261-270.
- Koy R., 2010. *Amélioration de la qualité des sols sableux du plateau des Batéké (RD Congo) par application des matériels géologiques et des déchets organiques industriels locaux*. Thèse de doctorat : Université de Gent (Belgique).
- Landon J.R., ed., 1991. *Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics*. Harlow, UK : Longman Scientific and Technical.
- Laudelout H., 1954. Mineral immobilization and the apparent utilization-coefficient of mineral fertilizers under some crops in the Belgian Congo. In: *Proceedings of the Second inter-african soils conference, volume 1*, 365-374.
- Lehmann J., Gaunt J. & Rondon M., 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems. A review. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change*, **11**, 403-427
- Lehmann J. & Joseph S., 2009. *Biochar for environmental management: an introduction*. London: Earthscan.
- Lele B., 2010. *Problématique de l'exploitation de bois de feu associée à la production agricole face à la conservation des forêts du district de la Lukaya en RDC et pistes de solutions*. Travail de fin d'étude de master complémentaire en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les pays en Développement : Université de Liège (Belgique).
- Lui J. et al., 2012. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **175**(5), 698-707.
- Major J. et al., 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*, **333**, 117-128.
- Ministère de l'Agriculture de la RDC, 2008. *Catalogue variétal des cultures vivrières : maïs, riz, haricot, arachide, soja, niébé, manioc, patate douce, pomme de terre et banane*. Kinshasa : Ministère de l'Agriculture.
- Mpoy T., 2009. *Effets comparés de l'engrais minéral (NP) à la matière organique (Cassia spectabilis) sur la production du maïs (Zea mays L.) à Ngandajika*. Mémoire de DEA : Université de Kinshasa (RDC).
- Mulaji C., 2011. *Utilisation des composts de biodéchets ménagers pour l'amélioration de la fertilité des sols acides de la Province de Kinshasa (République Démocratique du Congo)*. Thèse de doctorat : Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique).
- Muna-Mucheru M. et al., 2007. Effects of organic manure and mineral fertilizer inputs on maize yield and soil chemical properties in a maize cropping system in Meru South District. *Agrofor. Syst.*, **69**, 189-197.
- Nyasimi M.A., Amadalo B. & Obonyo E., 1997. *Using the wild sunflower Tithonia in Kenya for soil fertility and crop yield improvement*. Nairobi: ICRAF.
- Paliwal R.L., 2002. Introduction au maïs et son importance. In : FAO, éd. *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Rome : FAO, 1-3.
- Petit J. & Jobin P., 2005. *La fertilisation organique des cultures*. Longueuil, Québec, Canada : Fédération d'agriculture biologique du Québec.
- Pieter P. et al., 2012. Combining mineral fertilizer and green manure for increased, profitable Cassava production. *Agron. J.*, **104**(1), 178-187.
- Pixley K.V., 2003. *The development and promotion of quality protein maize in Sub-Saharan Africa. Progress report 2003*. Harare: CIMMYT.
- Ruganzu V., 2009. *Potentiel d'amélioration de la fertilité des sols acides par l'apport de biomasses végétales naturelles fraîches combinées à du travertin au Rwanda*. Thèse de doctorat : Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique).
- Schulz H. & Glaser B., 2012. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **175**(3), 410-422.
- Schulz H., Dunst G. & Glaser B., 2013. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agron. Sustainable Dev.*, **33**(4), 817-827.
- Serpantié G., 2009. L'agriculture de conservation à la croisée des chemins en Afrique et à Madagascar. *Vertigo*, **9**(3).
- Steiner C. et al., 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil*, **291**, 275-290.
- Tomisa S., 2011. *Effet de différentes doses du biochar combiné à l'engrais minéral sur la croissance et le rendement de la culture en pots de maïs dans les conditions du Mont Amba*. Travail de fin de cycle : Université de Kinshasa (RDC).
- UyoYbesere E.O. & Elemo K.A., 2000. Effect of inorganic fertilizer and foliage of *Azadirachta* and *Parkia* species on the productivity of early maize. *Nigerian J. Soil Res.*, **1**, 17-22.
- Van Den Berghe C., Theeten D. & Totognon J., 1990. Comparative responses of two maize varieties to fertilizers on a newly cleared ferrallitic soil in southern Benin – economic analysis. *Tropicicultura*, **8**, 3-8.
- Van Engelen V., Verdoodt A., Dijkshoorn K. & Van Ranst E., 2006. *Soil and terrain database of Central Africa - DR Congo, Burundi and Rwanda. SOTERCAF, Version 1.0*. ISRIC-UGent-FAO.
- Vanlauwe B., Tiftonell P. & Mukalama J., 2006. Within-farm soil fertility gradients affect response of maize to fertilizer application in western Kenya. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, **76**, 171-182.
- Violic A.D., 2002. Gestion intégrée de la culture. In : FAO, ed. *Le maïs en zones tropicales : amélioration et production*. Rome : FAO, 251-299.
- Zhang W. et al., 2010. Transport and retention of biochar particles in porous media: effect of pH, ionic strength, and particle size. *Ecology*, **3**, 497-508.