Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture
http://www.rafea-congo.com
2026 ; 9(2), 208-219
ISSN (Print) : 2708-7743 **eISSN** : 2708-5422 **Dépôt légal** : JL 3.01807-57259

Evaluation de l'Effet de la taille des particules de biochar sur le pH et caractérisation des oxisols de Kasangulu en République Démocratique du Congo (RDC)

Aimé Luboya Mutela[1,2*], Johnson Nkololo[1], Candice Kandolo Kaseme[1], Dorothé Ngabu[1], Bonanventure Lele Nyami[2], Christophe Lumpungu Kabamba[2], Irène Kibal Mande[1]

[(1)]Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM). Département de géologie urbaine et environnement. BP 898 Kinshasa/Gombe (RDC). E-mail : aimluboya@gmail.com
[(2)]Université de Kinshasa. Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement. Mention Gestion des Ressources Naturelles. BP 117 Kinshasa XI (RDC).

Reçu le mars 2026, **accepté le** 18 juin 2026, **publié en ligne le** 27 juin 2026
DOI : https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v9i2.18

RESUME

Description du sujet. Les sols de Kasangulu sont réputés acides, désaturés en bases échangeables et pauvre en éléments nutritifs majeurs utiles pour les plantes notamment l'azote et le phosphore ; leur amendement s'avère indispensable.
Objectif. La recherche vise à caractériser l'unité pédologique Acrisol de Kasangulu ainsi que le biochar de bambou (*Bambusa vulgaris*) et le biochar tout-venant destinés à amender ce sol.
Méthodes. Les paramètres des sols suivants ont été évalués : pH-eau, pH-KCl, acidité d'échange, bases échangeables, matière organique, N, P ass et P total. Tandis que dans les biochars : le pH-eau, le pH-KCl, le carbone organique, le carbone inorganique et l'azote ont été aussi évalués, ainsi que le pH-eau de onze fractions granulométriques de chaque biochar broyé et tamisé.
Résultats. Les résultats confirment les caractéristiques du sol de Kasangulu qui est un Acrisol (WRB), corrélé à Ultisol (USDA soil taxonomy). Par ailleurs, le biochar de bambou et le biochar tout-venant sont alcalins (pH 9,37 et pH 9,13 respectivement). La différence de pH entre les biochars est hautement significative ($p<0,001$), cependant la différence de pH entre les fractions granulométriques des biochars n'est pas significative ($p>0,05$).
Conclusion. L'application des biochars pour amender le sol de Kasangulu devra se faire avec toute la gamme granulométrique en vue d'améliorer le pH de ce sol.

Mots clés : Sol, granulométries Biochars, paramètres physico-chimiques, amendement, Kasangulu/RDC

ABSTRACT

Evaluation of the effect of biochar particle size on pH and characterization of Kasangulu oxisols in the Democratic Republic of Congo (RDC)
Description of the subject: The soils of Kasangulu are known to be acidic, desaturated in exchangeable bases and poor in major nutrients useful for plants, notably nitrogen and phosphorus.
Objective. The aim of the study was to characterize the Acrisol pedological unit in Kasangulu as well as bamboo biochar (Bambusa vulgaris S.) and random biochar and evaluate the effect of biochar particle size on pH
Methode. The following parameters were evaluated in Kasangulu soil: pH-water, pH-KCl, exchange acidity, exchangeable bases, organic matter, N, P ass and P tot. While in biochars: pH-water, pH-KCl, organic carbon, inorganic carbon and nitrogen were also evaluated, as well as the pH-water of eleven grain size fractions of each crushed and sieved biochar.
Results. The results confirm the characteristics of the soil of Kasangulu which is an Acrisol (WRB), correlated with Ultisol (USDA soil taxonomy). Moreover, bamboo biochar and all-hazards biochar are alkaline (pH 9.37 and pH 9.13 respectively). The difference in pH between the biochars is highly significant, however the difference in pH between the particle size fractions of the biochars is not significant ($p>0,05$).
Conclusion. The application of biochars to amend the soil of Kasangulu will be done with the entire grain size range. In order to improve the pH of this soil.

Keywords: Soil, biochar particle size distribution, physicochemical parameters, soil amendment, Kasangulu/DRC

1. INTRODUCTION

Le sol de Kasangulu identifié comme Acrisol (Van Engelen *et al.,* 2006) présente deux faciès : sableux aux extrémités Est et Ouest et argileux au centre. Ces sols sont soumis à une forte minéralisation de leur matière organique et un lessivage extrême des éléments minéraux causés par les précipitations intenses (>1600 mm/an) et les fortes températures. La coupe à blanc, la culture sur brulis et l'agriculture itinérante sont des pratiques agricoles courantes en milieu paysan (Ngongo *et al.,* 2009).

Ces pratiques agricoles dans le contexte éco-climatique du milieu d'étude ont pour conséquences : la perte rapide de la fertilité, la réduction de l'activité biologique édaphique, l'érosion du sol, ainsi que la réduction de la recharge de la nappe (Serpentié, 2009). Ce système agricole combiné aux processus pédologiques naturels aboutissent à des sols fortement dégradés et très acides (Ngongo *et al.* 2009 ; Pieter *et al.,* 2012,) ayant pour effet la réduction drastique de la production agricole (Kadiata *et al.,* 2003).

Sur le plan agricole, les conséquences se traduisent par de faibles rendements pour les principales cultures vivrières, notamment le maïs (*Zea mays* L.) dont le rendement en grains ne dépasse pas 1 t. ha^{-1} (Van Der Berg *et al.,* 1990 ; Chianu *et al.*,2002 ; Adjei-Nsiah *et al.,* 2007 ; Lele *et al.,* 2016). Aussi, le rendement des principales cultures baisse significativement après une saison culturale à cause de la perte de matières organiques qui contribuent énormément à la fertilité de sol (Shwetha *et al.,* 2025) et la lixiviation des éléments minéraux (Vanlauwe *et al.,*2006 ; Ngongo *et al.,*2009). Ces sols sont définis comme contenant, à toute profondeur, moins de 10 % de minéraux météoriques et une faible capacité d'échange cationique (Buol et Eswaran, 1999). Ils sont toujours de couleur rouge ou jaunâtre, due à leur forte teneur en fer (III), en oxydes et en hydroxydes d'aluminium.

Ces sols présentent des contraintes chimiques et biologiques liées à l'acidité, à la toxicité aluminique, à la forte capacité de rétention du phosphore (P), ainsi qu'à une forte désaturation en cations échangeables (Ca, Mg, K et Na). Ces contraintes posent des sérieux problèmes pour la mise en culture permanente dans les régions à faible revenu (milieux paysans) (Plassard *et al.,* 2015).

Pour ce qui concerne le phosphore, sa mobilisation exige la conception de système de production agricole dans lequel la biodisponibilité de P dans le sol est accrue et les apports de fertilisants minéraux sont limités ou substitués par des intrants phosphatés issus des ressources renouvelables (Van Kauwenbergh, 2003 ; Faucon *et al.,* 2016) notamment les résidus de culture et les biochars.

La récupération du P des sous-produits organiques sous forme de biochar a récemment été suggérée comme une stratégie prometteuse pour réduire l'utilisation des engrais minéraux (Lele *et al.,* 2016) et l'amélioration des propriétés physiques et chimiques de sol amandé (Houben *et al.,*2017 ; Lele *et al.,* 2022 ; Zhouhui Zhao *et al.*,2023). Plusieurs études ont été menées pour évaluer l'effet de biochar comme amendement dans la restauration des sols dégradés et acides avec des résultats intéressants et prometteurs (Schmidt *et al.,* 2023). Cependant, la taille des particules de biochars utilisés pour amender le sol est très variable (≥ 500 µm, <2000 µm, …).

Les résultats sont aussi variables dépendant de la nature de biomasse utilisée, de la température de pyrolyse (Lehman et Joseph, 2009) et probablement aussi de la taille des particules de biochar. L'objectif poursuivi est de caractériser le sol de Kasangulu, le biochar de bambou (*bambusa vulgaris Schrad*) et le tout-venant, ainsi que l'évaluation de l'effet de la taille des particules de biochars sur le pH.

Les résultats de cette étude peuvent aider les décideurs, dans le contexte actuel du changement climatique, de mettre en place des programmes agricoles qui prennent en compte les ressources locales pour améliorer la fertilité des sols.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Milieu d'étude

L'étude (réalisée du 05 juin au 30 décembre 2024) porte sur une unité pédologique (Acrisol, WRB ou Oxisol, USDA) du territoire de Kasangulu. Ce territoire fait partie du district de la Lukaya dans la province du Kongo Central. Kasangulu est situé entre les parallèles 4°30' et 5°00' de latitude sud et entre 15°00' et 15°30' de longitude Est. Le climat est du typeAW_4 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 de pluie est entrecoupée d'une petite saison sèche entre mi-décembre et mi-février. La température moyenne annuelle est de 24,5 °C. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1627 mm pour la période allant de 2017 à 2019 (INS, 2021). La topographie du terrain est accidentée, faite des collines et vallées dont certaines sont reliées par des cols.

Le choix de Kasangulu était motivé par sa proximité de la ville province de Kinshasa et la disponibilité de terre agricole au regard de la théorie de zone concentrique de Von Thünen (1783-

1850), relative à l'affectation agricole de sol par rapport à un marché central (Belhedi, 2010), en l'occurrence la ville province de Kinshasa. Le bambou est intéressant pour ses caractéristiques bénéfiques adaptées au terrain accidenté notamment : plante antiérosive, vivace, production abondante de la biomasse et peut bien s'intégrer dans un dispositif antiérosif en terrasse.

2.2. Sols

Le mot «sol » est inévitablement mentionné lorsqu'il est question de la surface continentale. Cependant, il a des significations différentes selon les différents spécialistes des divers domaines des sciences de la terre. Pour le pédologue, la définition du sol est fondée sur ces processus génétiques constituant la pédogénèse (Campy *et al.*, 2013). Ces processus donnent naissance à la couverture pédologique qui est une entité tangible : « objet continu et tridimensionnel, situé entre la lithosphère et l'atmosphère (ou hydrosphère), elle est formée des constituants minéraux et organiques présents à l'état solide, liquide et gazeux ; elle est organisée en horizon … » (Girard *et al.*, 2011).

Douze échantillons de sol meuble et 12 échantillons de sol argileux ont été récoltés à la profondeur de zéro à 20 cm. Ils ont été mélangés séparément pour former deux échantillons composites : sol meuble et sol lourd, prêt pour le traitement et les analyses.

2.3. Biochars

Le terme « biochar » est la forme contractée de « bio-charcoal », il désigne un produit organique poreux, riche en carbone obtenu par pyrolyse de la matière organique (résidus ou déchets agricoles et animaux) sous apport limité d'oxygène (Cornchissen *et al.*, 2016). Le charbon de bois produit par des procédés traditionnels a été acheté sur le marché (Matadi-Kibala à Kinshasa). Il est nommé bio-charbon tout-venant (BTV). Le bio-charbon de bambou (*Bambusa Vulgaris*) a été produit dans un dispositif en briques cuites (Figure 1) simulant le procédé traditionnel montré dans la figure 2.

Fig.1 Dispositif de pyrolyse et le produit de pyrolyse

Figure 2. Dispositif traditionnel de pyrolyse et le produit de pyrolyse

Le dispositif traditionnel pour pyrolyser la biomasse a était réalisé dans une fosse peu profonde dans laquelle la biomasse était entassée puis recouverte des feuillages, suivi de la terre (Figure 2). Un orifice de mise à feu a été aménagé à la base du tas (four) et quelques trous d'échappement ont été aussi aménagés. Lorsque le feu s'éteint et le tas s'affaisse après un temps raisonnable, on considère que la pyrolyse est terminée. L'ouverture du four pour récupérer le charbon de bois a été fait après un temps de refroidissement.

2.4. Méthodes

Les analyses de routine pour le sol ont été effectuées suivant les méthodes standards décrites par pauwels *et al*. (1992). Tandis que pour le biochar, celles annoncées par Lange (Lange *et al.*,

2018) ont été appliquées. Les paramètres caractéristiques retenus pour le sol et les biochars sont les suivants : la texture, la granulométrie, le pH eau, le pH KCl, l'acidité d'échange, le carbone organique, le phosphore assimilable, la capacité d'échange cationique (CEC) et les Cations Echangeables (Ca, Mg et K). Tandis que pour le biochar, il a été retenu les paramètres ci-après : pH eau, pH KCl, N, Carbone Organique, Carbone Inorganique et Acidité d'échange.

La texture de sol a été déterminée par analyse granulométrique, le pH-eau et la conductivité électrique ont été mesurés dans l'eau distillée, proportion 1:5 pour le sol et 1:10 pour le biochar ; les phosphores assimilable et total ont été déterminés par colorimétrie par la méthode au molybdate d'ammonium – acide ascorbique (Bray), la Capacité d'Echange Cationique a été déterminée par la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium. Les biochars broyés, au moyen des broyers montés dans la figure 3a, ont été tamisés dans une colonne de 11 tamis (Figure 3b) suivant la norme AFNOR dont les mailles en µm sont : 2000 – 1400 – 1000 – 710 – 500 – 355 – 250 – 180 – 125 – 90 - 63.

Figure 3. Broyeur vibrant et à mâchoire, colonne des tamis et balance

Le tamisage avait pour but de fractionner le biochar en différentes coupures au moyen de tamis à mailles décroissantes emboités les uns sur les autres. Enfin, Le but est de récupérer les différentes coupures pour en déterminer le pH. Quant au sol, ce même traitement a pour but de déterminer la distribution pondérale des différentes fractions granulométriques de la partie minérale d'un sol. Les fractions recueillies ont été pesées sur la balance (Figure 3c). L'élimination de la matière organique a été faite par oxydation avec l'eau oxygénée, la destruction du calcaire et la désagrégation des ciments (sesquioxydes amorphes) ont été faites par attaque à l'acide chlorhydrique suivi d'un lavage à l'eau distillée. Les résultats ont été traités à l'aide du programme « Gradistat » (Blott et Pye, 2001) pour déterminer les différents paramètres et indices caractéristiques du sédiment.

Le traitement des données (pH) des différentes coupures de biochar a été réalisé dans un dispositif factoriel 2*2 avec 2 types de biochars, 11 fractions granulométriques par type de biochar en trois répétitions, soit 66 observations (pH). Les logiciels Statistix 8.0 et R ont été utilisés pour ce faire. Les statistiques descriptives ont été utilisées pour quantifier la variabilité des données obtenues et visualiser leur distribution. Ces statistiques intègrent le calcul de la moyenne et de l'erreur standard.

3. RESULTATS

3.1. Texture et granulométrie

La texture et la granulométrie des sols de Kasangulu sont présentées respectivement au tableau 1 et à la figure 4.

Tableau 1. Texture de sols de Kasangulu

Sol	Sable	Argile	Limon	Texture
Sol 2 ◆	91,32%	5,34%	1,38%	SABLE
Sol 1 ◆	71,92%	22,02%	2,98%	LIMON ARGILO-SABLEUX

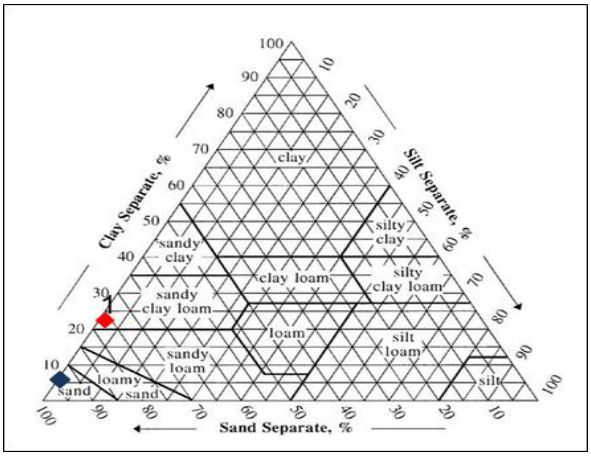

Figure 4. Triangle textural

Le sol 2 présente une texture de sable (Figure.4) et sa structure sur le terrain est particulaire minérale sableuse ; tandis que le sol 1 présente une texture de limon argilo-sableux (Figure 4) et sa structure sur le terrain est fragmentaire sphérique grumeleuse. Le sol est ici d'une part de nature limoneuse, ce qui lui confère des capacités moyennes en termes de drainage et de réchauffement. La texture limoneuse révèle que c'est un sol qui peut être sensible au tassement et à la battance. Il faut donc faire attention aux conditions dans lesquelles sont effectués les travaux de préparation de sol ; d'autre part, le sol est de nature sableuse, ce qui lui confère des capacités faibles en termes de rétention d'éléments nutritifs et de stabilité de structure de sol. La texture sableuse révèle que ce sol est sensible à l'érosion et au lessivage.

L'analyse granulométrique de l'échantillon sol 2 (Figure 5 à gauche) révèle qu'il s'agit d'un sable fin modérément trié (classé), contenant 5 % de sable grossier, 37 % de sable moyen, 37 % de sable fin et 21 % de sable très fin. La distribution est unimodale, le mode est de 302,5 µm. Tandis que l'échantillon sol 1 se révèle aussi comme un sable fin modérément trié, cependant, sa distribution granulométrique est différente de celle du sol 2. Le sol 1 est bimodal (Figure 5 à droite), il contient 3 % de sable grossier, 33 % de sable moyen, 40 % de sable fin et 24 % de sable très fin. Les modes 1 et 2 sont respectivement de 302,5 µm et 152,5 µm.

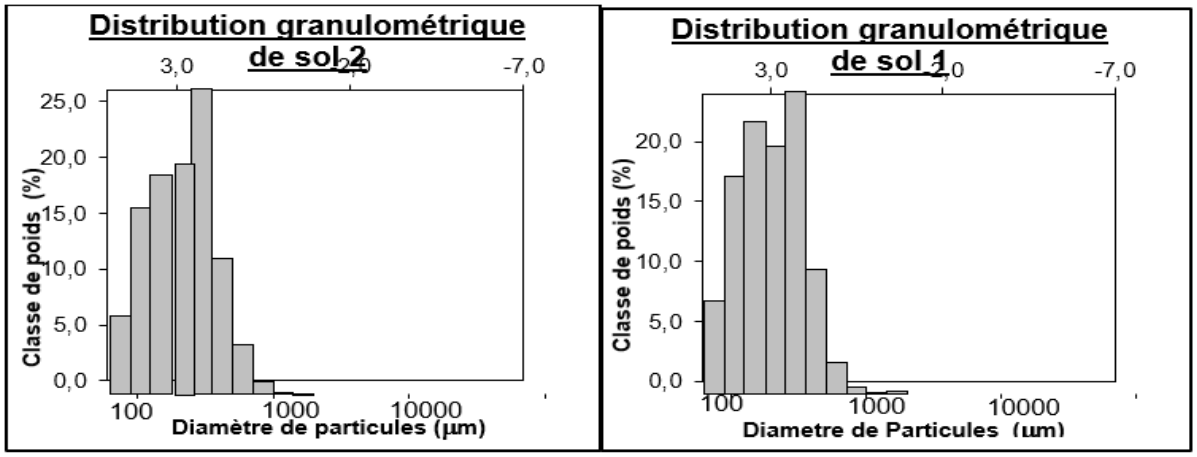

Figure 5. Distribution granulométrique de sols de Kasangulu

3.2. Propriétés physico-chimiques de sol de Kasangulu

Les propriétés physico-chimiques de sol de Kasangulu sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Humidité (%), pH, Acidité d'échange, matières organiques et azote

Paramètres	Humidité (%)	pH-H_2O	pH-KCl	P ass (mg/kg)	M.O (%)	C (%)	N (%)	C/N
Sol 2	3,00	5,55	4,9	37,62	4,12	2,39	0,235	10,16
Sol 1	2,76	5,84	5,5	31,62	2,25	1,3	0,134	9,7

L'échantillon sol 1 représente le sol limono-argilo-sableux de Kasangulu (sol lourd), ce sol est acide avec un pH-eau de 5,84 et pH-KCl de 5,50 valeur qui indique une acidité potentielle faible. L'acidité d'échange est évaluée à 0,89 méq/100g (tableau 3) et une quantité de matières organiques de l'ordre de 2,25 % (faible quantité) (Tableau 2). Un rapport C/N de 9,7 révèle un sol minéralisé à faible réserve en matière organique (10-14, valeur optimale). Le pH-eau du sol est de 5,84, et est non satisfaisant car éloigné de la gamme de pH idéal (6,5-7) qui permet le fonctionnement normal du sol. Le taux de saturation (32,87 %) montre que ce sol est désaturé en bases échangeables, ainsi un apport nutritionnel est donc envisageable.

Quant à l'échantillon sol 2, il est meuble et recouvre le sol 1 argileux là où l'érosion n'a pas tout emporté. Il est aussi acide (pH-eau 5,55) et (pH-KCl 4,9) indiquant une acidité potentielle moyenne. Avec une quantité appréciable de matière organique (4,12 %) et un taux de saturation (55,62 %) favorable pour certaines cultures tropicales. L'acidité d'échange évalué à 1,19 Cmol (+)/kg et un taux de matières organiques de 4,12 %, le sol de Kasangulu représenté par l'échantillon sol 2 peut être désigné « sablo-humifère » ; ce qui n'est pas le cas pour le sol 1. Le rapport C/N de 10,15 révèle une matière organique bien décomposée. Le tableau 3 présente les résultats sur l'acidité d'échange, les cations échangeables, la capacité d'échange cationique et le taux de saturation.

Tableau 3. Acidité d'échange, cations échangeables, CEC, Taux de Saturation

Paramètre	Al^{+++} cmol c/Kg	H^{+} cmol c/Kg	Ca^{++} cmol c/Kg	Mg^{++} cmol c/Kg	K^{+} cmol c//Kg	Na^{+} cmol c/Kg	S cmol c/Kg	CEC cmol c//Kg	V (%)
Sol 2	1,06	0,13	0,90	0,46	0,22	0,10	1,68	3,02	55,62
Sol 1	0,69	0,20	0,68	0,18	0,06	0,04	0,96	2,92	32,87

Le phosphore assimilable dans le sol meuble de Kasangulu est évalué 37,62 mg/kg de sol tandis que dans le sol lourd à 31,62 mg/kg de sol. Ces valeurs sont très faibles au regard du seuil de déficience qui se situe vers 30 ppm de P_2O_5 (Anonyme, 1998). Cette valeur n'est pas statique. Elle varie avec la régularité et l'intensité de la minéralisation des matières organiques dans le sol, activité qui dépend étroitement des bactéries et autres micro-organismes telluriques et elle est fonction du pH. Ainsi, dans le sol ferralitique ou la teneur en azote est de l'ordre de 1 % et plus, le pouvoir fixateur du P est faible à moyen, le seuil de déficience P_2O_5 varie de 50 à 100 ppm ; lorsque le pouvoir fixateur est fort, le seuil de déficience est doublé (100 à 200 ppm). Le calcium échangeable a été évalué à 0,9 cmol (+)/kg dans le sol meuble et à 0,68 cmol(+)/kg dans le sol lourd (Tableau 3). Un niveau moyen pour les deux sols. Pour le calcium échangeable, on estime qu'en dessous de 0,5 cmol (+)/kg de sol, la réussite de la plupart des cultures est aléatoire. Tandis qu'un niveau convenable se situe dans l'intervalle entre 2 à 3 cmol (+) /kg de sol. Le sol lourd est pauvre en Mg et K, tandis que le sol meuble présente un niveau moyen en K et riche en Mg.

3.3. Biochars

Le biochar est un produit organique poreux riche en carbone obtenu par pyrolyse de la matière organique (résidus ou déchets agricoles et animaux) sous apport limité d'oxygène (Cornelissen *et al.*, 2016). Ici, il s'agit de biochar de bambou (BB) et le tout-venant (BTV). Le biochar de bambou et le biochar tout-venant analysés présentent les caractéristiques physico-chimiques reprises dans les tableaux 4 et 5. Le tableau 4 présente les résultats sur le taux d'humidité, le phosphore assimilable, le phosphore total, le carbone inorganique, le carbone organique, le carbone total et l'azote.

Tableau 4. Humidité, P ass.,P tot., C inorg, C org, C total et Azote

Paramètres	Humidité (%)	P ass. (mg/kg)	P tot (mg/kg)	Carbone inorg. (%)	Carbone org. (%)	Carbone tot. (%)	Azote (%)
BB	1,58	52,39	80,6	0,94	55,01	55,95	0,55
BTV	1,50	43,91	83,4	0,67	55,13	55,80	0,57

Le biochars de bambou et le biochar tout venant contiennent plus de phosphore et les bases échangeables que le sol meuble et le sol lourd de Kasangulu (Tableau 4). Les pH des biochars de bambou et le tout-venant sont alcalins : pH 9,03 et pH 9,11 respectivement (Tableau 5). La Teneur en carbone inorganique est de 0,94 % et 0,67 % respectivement. Le carbone inorganique joue un rôle important dans le pouvoir tampon de biochar. Le tableau 5 présente les résultats sur le pH eau, pH KCl, et les bases échangeables dans les biochars.

Tableau 5. pH eau, pH $_{KCl}$ et bases échangeables dans les biochars

Paramètres	pH eau	pH_{KCl}	Ca (mg/Kg)	Mg (mg/Kg)	K (mg/Kg)	Na (mg/Kg)
BB	9,03	8,57	2,72	1,77	0,125	0,69
BTV	9,11	8,70	2,80	1,77	0,128	0,98

La figure 6 illustre la variation du pH de biochars en fonction de la granulométrie. A petite échelle, les courbes sont presque linéaires avec variations de faibles amplitudes. En agrandissant l'échelle sur l'axe des ordonnées (pH), les variations sont remarquables et seront analysées par la méthode statistique.

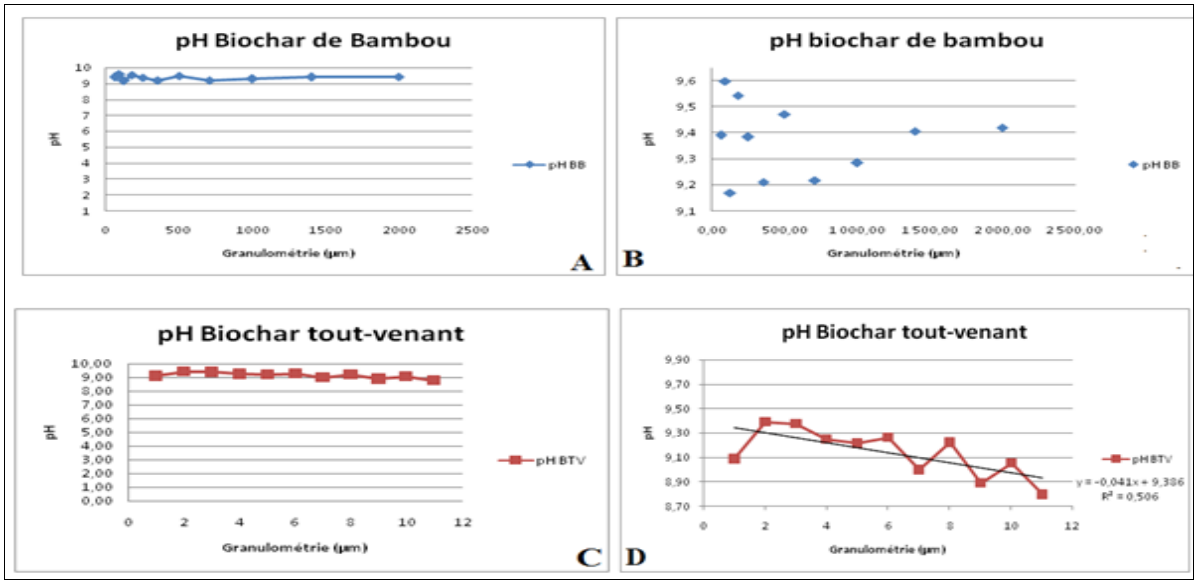

Figure 6. pH des biochars en fonction de la granulométrie

Le pH des biochars de bambou et le pH de biochar tout-venant sont alcalins avec une moyenne de pH 9,37 et 9,14 respectivement. Considérant la plus petite différence significative de 0,1147 (Tableau 6), la différence entre les deux moyennes est statistiquement significative. Cependant, le biochar de bambou ne présente aucun rapport entre la taille des particules et le pH (Figure 6 a et 6 b) tandis qu'il existe une faible corrélation entre la taille des particules de biochar tout-venant et le pH (Figure 6 C et 6 D), le coefficient de détermination R^2 = 50 %. Le Tableau 6 présente les résultats d'analyse statistique de l'effet du type de biochar sur le pH.

Tableau 6. Effets des biochars sur le pH

Biochars	Moyenne pH
BB	9,3718[a]
BTV	9,1385[b]
PPDS(LSD)	0,1147
CV(%)	2,4900

Alpha : 0.05 ; Erreur standard pour la comparaison : 0.0568 ; Valeur T critique : 2.018 ; valeur critique pour la comparaison (LSD) : 0.1147

La différence de pH entre le biochar de bambou (BB) et le biochar tout-venant est hautement significative ($p<0.001$) tel qu'indiqué dans la Figure 7.

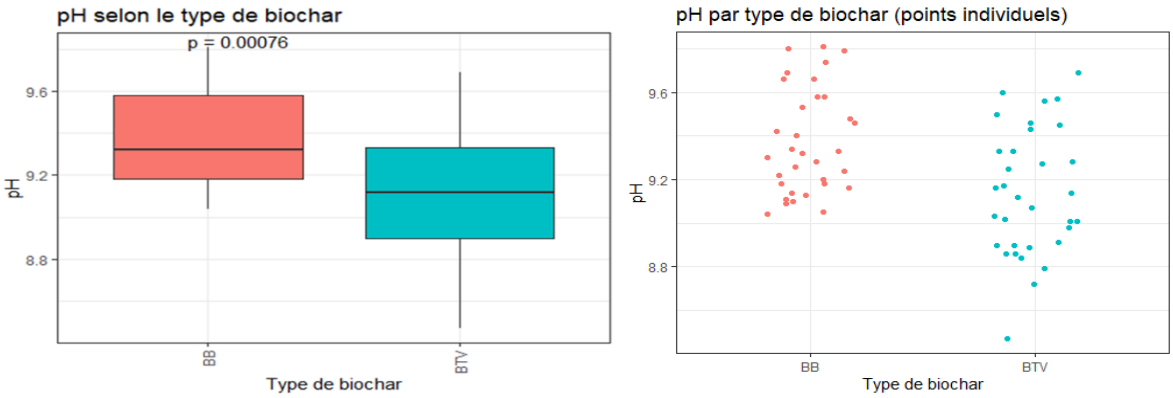

Figure 7. pH en rapport avec les types de biochars

Le tableau 7 présente le résultat d'analyse statistique de l'effet de la granulométrie de biochar sur le pH.

Tableau 7. Effets de granulométrie sur le pH, comparaisons des moyennes

GRANULO	Moyenne pH	Groupes Homogènes
G90	9.4933	A
G180	9.3950	AB
G250	9.2983	ABC
G125	9.2717	ABC
FOND	9.2383	ABC
G355	9.2367	ABC
G500	9.2333	ABC
G1400	9.2300	ABC
G710	9.2183	BC
G2000	9.1067	C
G1000	9.0850	C

Alpha : 0.05; Erreur Standard pour la comparaison : 0.1333 ; Valeur T critique : 2.018 ; Valeur critique pour la comparaison :0.2690

Le test LSD (PPDS) de comparaison par paires des moyennes de pH pour les biochars (BB*BTV) révèle 3 groupes (A, B et C) pour les 11 classes granulométriques dans lesquels les moyennes ne sont pas significativement différentes les unes des autres.

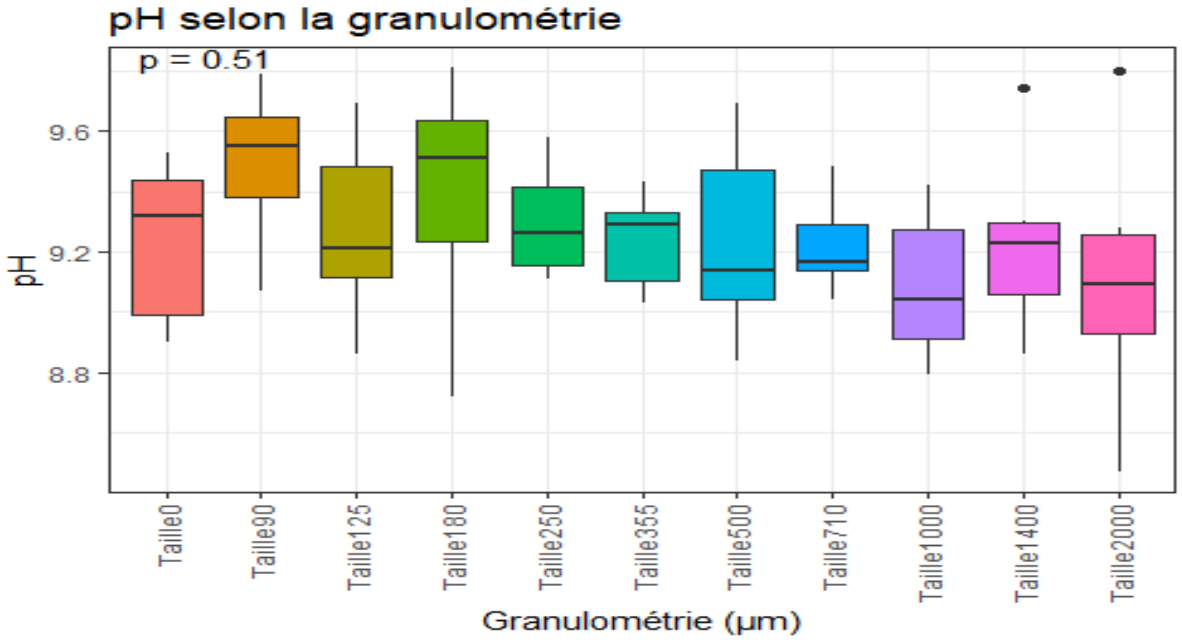

Figure8. pH de biochar en rapport avec la taille des particules (granulométrie)

Tableau 8. Effets de biochars et de la granulométrie sur le pH

Biochars	Granulo	Moyenne	Groupes Homogènes
BB	G90	9.5967	A
BB	G180	9.5433	AB
BB	G500	9.4700	AB
BB	G2000	9.4200	ABC
BB	G1400	9.4067	ABC
BTV	G90	9.3900	ABC
BB	FOND	9.3900	ABC
BB	G250	9.3833	ABC
BTV	G125	9.3733	ABCD
BB	G1000	9.2833	ABCD
BTV	G355	9.2633	ABCDE
BTV	G180	9.2467	ABCDE
BTV	G710	9.2200	ABCDE
BB	G710	9.2167	ABCDE
BTV	G250	9.2133	BCDE
BB	G355	9.2100	BCDE
BB	G125	9.1700	BCDEF
BTV	FOND	9.0867	CDEF
BTV	G1400	9.0533	CDEF
BTV	G500	8.9967	DEF
BTV	G1000	8.8867	EF
BTV	G2000	8.7933	F

Le test LSD de toutes les comparaisons par paires de pH pour biochar*granulométrie révèle six groups (A, B, C, D, E et F) dans lesquels les moyennes de pH ne sont pas significativement différentes les unes des autres (Tableau 9).

Tableau 9. ANOVA (Table pour pH)

Source	DF	SS	MS	F	P
REPETITION	2	0.65346	0.32673		
BIOCHARS	1	0.89833	0.89833	16.85	0.0002
GRANULO	10	0.79508	0.07951	1.49	0.1766
BIOCHARS*GRANULO	10	0.89383	0.08938	1.68	0.1186
Error	42	2.23874	0.05330		
Total	65	5.47945			

Grand Mean : 9.2552 CV : 2.49

Il y a une différence hautement significative de pH entre le biochar de bambou et le biochar tout-venant, P < 0,001. Cependant, les différences de moyennes de pH entre fractions granulométriques ne sont pas significativement différentes les unes des autres, P > 0,05 (Figure 9).

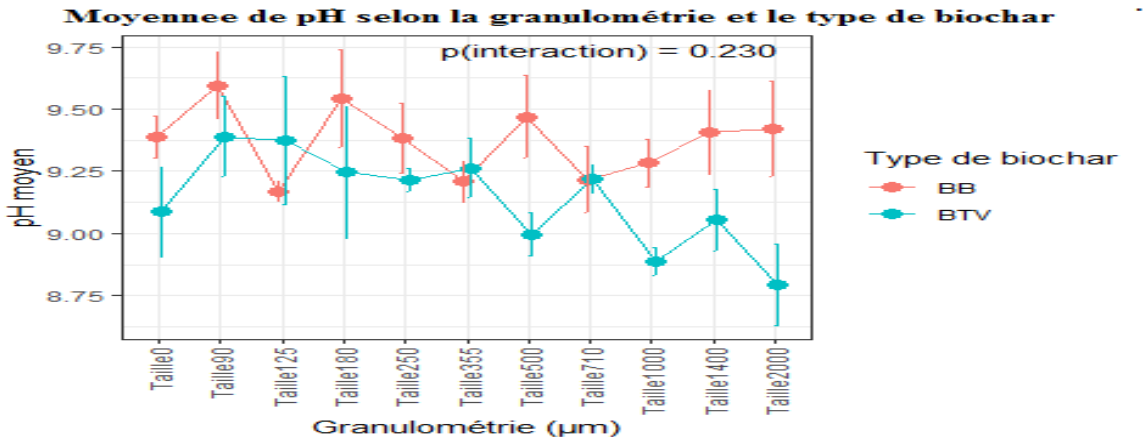

Figure 9. Effet de la granulométrie et du type de biochar sur le pH

Ainsi, l'application des biochars devra être faite avec toute la gamme granulométrique parce que chaque taille de particules peut jouer un rôle différent dans la rétention de l'eau, la protection de sol contre l'érosion et le tassement. Une granulométrie homogène peut être envisagée si un comportement particulier est recherché ou si l'effet de la granulométrie sur le pH était significatif.

4. DISCUSSION

Les résultats de l'étude démontrent que le sol de Kasangulu est un sol acide, désaturé, pauvre en bases échangeables, contenant des argiles à faible activité (CEC < 5 cmol (+) /kg de sol), pauvre en Azote (0,15 % en moyenne), pauvre en phosphore (34 mg/kg de sol en moyenne) dans les vingt premiers centimètres. La plupart des paramètres déterminés correspondent avec ceux trouver par d'autres auteurs (Van Engelen, *et al.*, 2006 ; Baert *et al.*, 2009, Ngongo *et al.*,2009).

L'Ultisol est facilement assimilé à Oxisol du fait que ces deux sols sont acides, fortement altérés, désaturés en bases échangeables, pauvres en éléments nutritifs majeurs pour les plantes notamment : N et P, teneur en matières organiques moyenne à très faible. Les minéraux résiduels constitués essentiellement de la Kaolinite, d'oxides de Fer et d'Aluminium pour les Oxisols et moins de 10 % des minéraux météoriques pour les Ultisols. Ces caractéristiques corroborent celles décrites par les auteurs Beart *et al.* (2009), Ngongo *et al.* (2009).

Par ailleurs, le biochar de bambou et le biochar tout venant sont alcalins : pH 9,37 et pH 9,13, des valeurs proches à celles trouvées par Lange *et al.* (2018) pour les bois durs. Les teneurs en carbone organique total pour les deux biochars sont très proches : 55,9 % et 58,8 % respectivement. Ces biochars contiennent plus des cations échangeables et les éléments nutritifs pour les plantes que n'en contient le sol de Kasangulu. Les caractéristiques de sol de Kasangulu requièrent une intervention pour améliorer les paramètres édaphiques particulièrement le pH en appliquant les biochars, technique qui a fait ses preuves dans l'élévation de pH de sol acide (Zhongmin *et al.*, 2014), dans la mobilisation de Fe et Al pour débloquer le Phosphore (Allohverdi *et al.*, 2021 ; Siwen Zhang *et al.*, 2023) et l'amélioration de la fertilité de sol (Ayaz *et al.*, 2021 ; Kebir *et al.*, 2023). Ce, en vue de garantir la production agricole abondante et durable pour répondre aux besoins d'une population croissante et ainsi garantir la sécurité alimentaire et la protection de l'environnement par la sédentarisation de l'agriculture paysanne.

5. CONCLUSION

En somme, l'application des biochars pour restaurer le sol dégradé de Kasangulu devra être faite avec toute la gamme granulométrique considérant que chaque taille de particule de biochar peut jouer un rôle diffèrent dans la rétention de l'eau, la protection de sol meuble contre l'érosion et le tassement de sol lourd. Une granulométrie homogène peut être envisagée si un comportement particulier est recherché.

Enfin, cette étude ouvre des perspectives de recherche supplémentaires : il serait pertinent d'évaluer les effets à long terme de différentes granulométries sur la microbiologie des sols, la production agricole et la stabilité chimique du biochar, afin d'étudier les possibilités de diffusion de cette téchnologie en milieu paysan. Des investigations comparées sur divers types de biochars et sur d'autres régions à oxisols pourraient également enrichir la compréhension de ces interactions.

Références

Adjei-Nsiah S., Kuyper T.W., Leewis C., Abekoe M.K. & Giller K.E., 2007. Evaluating sustainable and profitable cropping sequences with cassava and four legume crops: Effect on soil fertility and maize yields in the forest/savannahA transitional agroecological zone of Ghana. *Field Crops Res.* 103, 87-97.

Allohverdi T., Amar Kumar M., Poritosh R. & Manjousri M.; 2021. Un examen de l'état actuel des utilisations du biochar dans l'agriculture. *Molécules*, 26(18), 5584. https://doi.org/10.3390/molecules26185584

Anonyme, 1993. *Mémento de l'agronome* ; 4eme édition, Collection « technique rurales en Afrique », Ministère de la Coopération, France, 1635 p.

Ayaz M., Feiziené D., Tilvikiené V., Akhtar K., Stulpinaité U. & Iqbal R.. 2021. Role du biochar dans la durabilité de l'agriculture et de l'environnement. *Durabilité*, 13(3), 1330. https://doi.org/10.3390/su13031330

Baert G., Van Ranst E., Ngongo M.L., Kasongo E.L., Verdoodt A., Mujinya B.B. & Mukalay J.M., 2009. *Guide des Sols en R.D. Congo*. Tome II : Description et Données Physico-Chimiques de profils types, Université de Gand, Hogent, UNILU – AGCD, Belgique, 321 p.

Belhedi A., 2010., *Les modèles de localisation des activités économiques*, 203 p. http://mlae.site.voila.net. http://amorbelhdi.250free.com

Blott S. J. & Pye K., 2001. A grain Size Distribution Package for the analysis of unconsolidated sediments by sieving or laser granulometer. *Earth surface processes and Land forms*, 26, 1232-1248.

Buol S.W. & Eswaran H.O., 1999. *Advances in Agronomy*. Academic Press : Cambridge, MA, Etats-Unis, vol. 68, pp. 151-195.

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.

Campy M., Macaire J.J. & Grosbois C., 2013. *Géologie de la surface : Erosion, Transfère et Stockage dans les environnements continentaux*. Dunod 3eme Edition, 442 pages.

Cornelissen G., Pandit N. R., Taylor P., Pandit B. H., Sparrevik M. & Schmidt H.P., 2016. Emissions and char quality of flame-curtain "Kon Tiki" kilns for farmer-scale charcoal/biochar production. *PLoS ONE*, 11(5), 1-16.

Houben D., Hardy B., Faucon M.P. & Cornelis J.T., 2017. Effet du biochar sur la biodisponibilité du phosphore dans un sol limoneux acide. *BASE*, 21(3),18-22.

Faucon M.-P., Michel E., Lambers H. & Houben D.,2016. Avancées et Perspectives sur l'amélioration de la disponibilité du phosphate dans les systèmes de cultures. *Agronomie, Environnement et sociétés (BASE)*, 6(1), 77-85

Girard M.C., Walter C., Rémy J.C. *et al*., 2011. Sols *et environnement. Cours, exercices corrigés et études de cas.* Dunod. 2eme Edition, 896 p.

INS, 2021. *Annuaire Statistique R.D.C., 2020*. Ministère du Plan, Mars 2021 République Démocratique du Congo, 398 p.

Josely Dantas F., Lucia H. G. C., Mendes J. S., Chaves I. B. & Tito G. A., 2018. Soil Chemical Amendment sand the Macronutrients Mobility Evaluation in Oxisol Treated with Biochar. *Journal of Agricultural Science*, 10(10), 238-247. Doi:10.5539/jas.v10.

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.

Kebir E., Ki-Hyun K. & Kwon E. E., 2023. Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*, 17 p, 111324533 https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533

Lange S.F., Allaire SE, Charle A., Auclair I. & Bajzak CE 2018. *Propriétés physicochimiques de biochars.* CRMR-2018-SA1. Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, Université Laval et GECA Environnement, Québec, QC, Canada, 60 p. DOI : 10.13140/RG.2.2.25450.41924

Lehmann J. & Joseph S., 2009. Biochar for Environmental Management : an introduction. In *biochar for Environmental Management. Science and Technology*. Earthscan London, pp. 1-12.

Lele Nyami B., Kachaka Sudi C. & Lejoly J., 2016. Effet du biochar et des feuilles de Tithonia diversifolia combiné à l'engrais minéral sur la culture du mais (*Zea mays* L.) et les propriétés d'un sol ferralitique à Kinshasa. *BASE*, 20(1), 1-11.

Lele Nyami B., Kachaka Sudi C., Lejoly J. & Muesa Kalala P., 2022. Effet du biochar sur la rétention et la disponibilité en eau et éléments minéraux pour les plantes dans un sol sableux de Kinshasa. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, 5(3), 19-29.

Ngongo M.L., Van Ranst E., Beart G., Kasongo E. L., Verdoodt A., Mujinya B.B. & Mukalayi J.M., 2009. *Guide des sols en R.D. Congo*. Tome I, Etude et Gestion. Ugent, HoGent, UNILU, Lubumbashi, R.D. Congo, 262 p.

Pauwels J.M., Van Ranst E., Verloo M. & Mvondo Ze A.,1992. *Manuel de Laboratoire de Pédologie, Méthodes d'Analyses de Sols et de Plantes, Equipements, Gestion de Stocks de Verrerie et de Produits Chimiques, Publications Agricoles – 28 ACGD*. Centre Universitaire de Dschang, 265p

Pieter P., Bimponda W., Lodi-Lama J.P., Lele B., Mulumba R., Kachaka C., Boeckx P., Merckx R. & Vanlauween B., 2012. Combining mineral fertilizer and green manure for increased profitable Cassava production. *Agronomy Journal*, 104(1), 178-187.

Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J., Herrmann L., Walthalsong K., Lesueur D., Blanchart E., Chapuls-Lardy L. & Hinsinger P., 2015. Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? *Innovations Agronomiques*, 43**,** 115-138.

Serpentie G., 2009. L'agriculture de conservation à la croisée des chemins en Afrique et à Madagascar. *Verti*gO, 9(3).

Schmidt M.J. & Taylor P. J. 2023. Supplementary Materials for Intentional creation of carbon-rich dark soils in Amazon. *Sci. Adv.*, 9(8499), 122. DOI: 10.1126/sciadv. adh8499

Shwetha G.Y., Ningombam B. D., Bomika R., Gautam V. C. & Paramita D. 2025. *Advances in fertility management for sustainable agriculture in Advances in soil science, the pathways to sustainable agriculture.* First Edition. The Pustakalaya, Bangla Bazar, India, pp. 1-25,

Siwen Z., Qichao Z., Wim de Vries, Gerard H. R., Xiaohui C., Muhammad Atif M., Fusuo Z. & Liangquang W., 2023. Effets of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 345, 12 p. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531

Van Den Berghe C., Theeten D. & Totognon J., 1990. Comparative responses of two maize varieties to fertilizers on a newly cleared ferralitic soil in southern Benin. *Economic analysis, Tropicultura*, 8(1), 3-8.

Van Engelen V., Verdoodt A., Dijkshoom K. & Van Ranst E., 2006. *Soil and Terrain Database of Central Africa (D.R. Congo, Burundi and Rwanda)*. Report 2006/07, ISRIC- World Soil Information, Wageningen, 21 p.

Van Kauwenbergh S.J., 2003. Overview of *World Phosphate Rock production .In* **S**.S.S. Rajan & S.H. Chien, *eds .Direct application of phosphate Rock and related technology: latest developments and pratical experiences. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16-20 july 2001* International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, 441P

Vanlauwe B., Tittonel P. & Mukalama J., 2006. Within-farm soil fertility gradiens affect response of maize to fertilizer application in Western Kenya. *Nutr. Cycling Agroecosyst*. 76,171-182.

Zhongmin D., Yining W., Niaz M. *et al*., 2014. The Effets and Mechanisms of Soil Acidity Changes, following Incorporation of Biochars in Three Soils Differing in initial pH. Soil *Science Society of America journal*, 9 pages. https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0340

Yolou F.I., 2015. Maraichage en milieu urbain à Parakou au Nord-Bénin et sa rentabilité économique. *Int. J. Innovation Sci. Res*., 19(2), 290-302.