

Amélioration des Propriétés de Charge de Surface des Sols Fortement Altérés de l'Hinterland de Kinshasa par Application de la Dolomie Rose de Kimpese et de la Parche de Café.

KOY KASONGO Ruben ^{1*}, KANYANKOGOTE MPAGAZEHE Prosper¹, DISA DISA Pascal²,
 BAERT Geert³, VAN RANST Eric⁴

Paper History

Received : October 13, 2020
 Revised : November 01, 2020
 Accepted : December 16, 2020
 Published : March 27, 2021

Keywords

Arenosols, point of zero charge, electrical charge, chemical fertility and variable charge.

ABSTRACT

Improving the Charge Properties of Highly Weathered Soils of the Kinshasa's Hinterland by Using Pink Dolostone from Kimpese and Local Coffee Waste.

The Arenosols of Kinshasa's hinterland are characterized by a low chemical fertility, an acid reaction and a mineralogical composition limited to quartz, kaolinite and some residual oxides of Al and Ti. The effects of pink dolostone from Kimpese (PDK) and coffee waste (CW) application on the charge properties of the Batéké soils were studied in vitro using a completely randomized experimental design. Different amounts of 6.4 g CW. (kg sol)⁻¹ and 1748 mg PDK. (kg sol)⁻¹, corresponding to 20.0 t.ha⁻¹ of CW and 5.46 t.ha⁻¹ of finely grounded PDK were mixed with topsoil (0-25 cm), and incubated and leached for 3, 6, 9, and 12 months. The use of CW and PDK as amendments resulted in a significant (p<0.05) increase in chemical soil fertility indicators (pH, available phosphorus, sum of basic cations, organic carbon and total nitrogen content and base saturation). The study revealed that CW is an excellent organic manure and NPK nutrient provider for crops. Studying the charge properties of the Batéké soils, it was found that the application of CW and PDK to soil, (i) significantly increased the soil pH (pH_{0.002}), (ii) decreased the point of zero charge (pH₀), (iii) substantially increased the negative charge components, CEC_T and CEC_B, with concomitant decrease of the positive charge component (AEC). Furthermore, a strong exponential correlation was found ($R^2 = 0.94$; $y = 0.97 e^{-0.63x}$) between the negative charge CEC_T and the difference (pH₀ - pH_{sol}), indicating that the Gouy-Chapman model is likely an alternative option for sustainable management of the Kinshasa's hinterland soils. The PDK and the CW materials have thus, all requirements to improve significantly the charge properties of the highly weathered Batéké soils.

¹Laboratoire de Pédologie-géochimie, Faculté des sciences, Université de Kinshasa, BP 190 Kinshasa XI, R.D. Congo.

²Laboratoire de chimie des eaux, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, BP. Kinshasa XI, R.D. Congo.

³Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université de Gand, Krijgslaan 281 (S8), B-9000 Gand, Belgique.

⁴Département de l'Environnement, Faculté des Bio-ingénieurs, Université de Gand, Belgique.

*Corresponding author, e-mail: kasongo125@yahoo.fr

INTRODUCTION

L'hinterland de Kinshasa est une banlieue située à l'est de la ville province de Kinshasa, République Démocratique du Congo (RDC). Cette périphérie-est de Kinshasa, communément appelée

plateau des Batéké est couverte principalement des Arénosols qui occupent une vaste étendue en RDC. Ces sols sableux sont hérités des sables de recouvrement du type Kalahari, d'origine fluviale et/ou fluvio-lacustre et d'âge fin Tertiaire à Pléistocène [SYS, 1983]. Selon le système de classification de l'INEAC (Institut

National d'Etudes Agronomiques au Congo), ces sols appartiennent au grand groupe des Aréno-Ferralsols, sous-ordre des Hydroxo-Xérokalisols [SYS *et al.*, 1961], bien que les sols de Menkao (situé à l'ouest du plateau) aient été classifiés ultérieurement suivant USDA Soil Taxonomy [SOIL SURVEY STAFF, 1992] et FAO/UNESCO Revised Legend [FAO-UNESCO, 1990] comme Kandistults et Geric Ferralsols, respectivement [MARCELINO, 1995]. En général, les sols de l'hinterland de Kinshasa sont classifiés comme Arénosols [WRB, 2006] et Orthic Régosols selon le système Canadien de classification des sols [VANDENBYGAART, 2011].

La faible fertilité chimique et le faible pouvoir de rétention en eau dû principalement à la texture sableuse et à la présence d'argile kaolinique des sols, combinée aux oxydes résiduels d'Al, de Fe et de Ti, constituent les principales contraintes des sols à la production agricole dans cette région.

Plusieurs références de la littérature ont révélé que les sols de l'hinterland de Kinshasa présentent une granulométrie essentiellement sableuse, une réaction acide avec une faible réserve en nutriments minéraux et organiques et sont caractérisés par un stade ultime d'altération [MARCELINO, 1995 ; BAERT, 1995 ; KASONGO *et al.*, 2009, 2010 et 2012]. Ce sont des sols fortement altérés avec un niveau de fertilité très bas et possédant des colloïdes à charge variable. L'utilisation agricole des sols à charge variable est généralement tributaire de l'amélioration des propriétés de surface, notamment la neutralisation de l'acidité (augmentation du pH par chaulage) et/ou la diminution du point de charge zéro (pH₀) par les matériels organiques et/ou silicatés et phosphatés afin d'augmenter la charge négative variable (σ_v) conformément à l'équation de Gouy-Chapman [UEHARA ET GILLMAN, 1981].

$$\sigma_v = \left(\frac{2n\varepsilon RT}{\pi} \right)^{1/2} \sinh 1.15(pH_0 - pH)$$

Cependant, l'utilisation des matériels rocheux et/ou des déchets organiques de l'industrie agro-alimentaire susceptibles d'augmenter sensiblement le pH du sol avec une diminution concomitante de pH₀, constituerait une option alternative de gestion durable des sols sableux de l'hinterland de Kinshasa. En effet, plusieurs travaux de recherche effectués sur les sols tropicaux pauvres par applications des roches pétrofertilisantes ou agro-minérales et des déchets organiques ont donné des résultats fort intéressants concernant l'amélioration des propriétés des charges de surface des sols étudiés [VAN RANST, 1994; GILLMAN *et al.*, 2001 et 2002; SHAMSHUDDIN, 2001; NOBLE *et al.*, 2003; QAFOKU *et al.*, 2004 ; ANDA, 2006; ANDA *et al.*, 2009; KASONGO *et al.*, 2009, 2010 et 2012].

D'après VAN STRATEEN [2007], lorsqu'un matériel chaulant (CaCO₃) finement broyé est appliqué à un sol acide, il réagit avec ce dernier suivant le mécanisme ci-après :

CaCO₃ ⇌ Ca²⁺ + CO₃²⁻ (dissociation de la chaux) ; CO₃²⁻ + 2 H₂O ⇌ H₂CO₃ + 2 OH⁻ (hydrolyse de carbonate) ; 2 (Sol)-H + Ca²⁺ ⇌ (Sol)=Ca + 2 H⁺ (substitution des ions H⁺ par Ca²⁺ dans le complexe argilo-humique) ; 2 H⁺ + 2 OH⁻ ⇌ 2 H₂O (neutralisation de l'acidité du sol). Ce mécanisme peut être représenté globalement par la réaction suivante :

2 (Sol)-H + CaCO₃ ⇌ (Sol)=Ca + H₂CO₃ (CO₂↑ + H₂O). Le chaulage entraîne cependant, plusieurs conséquences immédiates dans les sols acides, il s'agit notamment de : (i) la neutralisation de l'acidité du sol, (ii) l'augmentation de la saturation en bases, (iii) la variation du rapport entre les cations adsorbés et en solution, (iv) l'augmentation du pH (dès le dégagement de CO₂), affectant la solubilité de plusieurs composés et favorisant la disponibilité des nutriments, ainsi que l'efficacité des fertilisants minéraux, (v) la réduction significative des concentrations phytotoxiques d'Al et de Mn, et probablement des autres substances, (vi) la réduction de l'altération acide des minéraux primaires et secondaires, suite à la diminution des ions H⁺, (vii) l'augmentation de la charge négative variable (σ_v-), (viii) la diminution de la charge positive variable (σ_v+), (ix) l'augmentation de la minéralisation et de la fixation de l'azote au pH élevé, et (x) l'augmentation de la concentration électrolytique due à la dissolution de la chaux.

Par ailleurs, les travaux de recherche de QAFOKU *et al.* [2004] et de KASONGO *et al.* [2009] ont montré que l'utilisation des matériels organiques comme amendements des sols tropicaux pauvres et acides produit une amélioration significative de la charge négative variable des sols due à la diminution significative du point de charge zéro (pH₀). De plus, les investigations de HAYNES ET MOKOLOBATE [2001], GLASER *et al.* [2002], ANO ET UBOCHI [2007], KASONGO *et al.* [2009] et de OORTS *et al.* [2020] ont révélé que les engrais organiques usuels (fumiers, engrais verts, résidus et déchets organiques, composts), améliorent les propriétés physico-chimiques des sols tropicaux pauvres, et par conséquent, augmentent leur productivité agricole. Parmi celles-ci, on peut citer entre autres, (i) l'augmentation de la teneur en matière organique (carbone organique C.O), laquelle contribue à l'augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) et à la production des charges négatives variables, (ii) l'augmentation de l'état nutritif du sol, particulièrement des nutriments NPK et des éléments en trace ou oligo-éléments (Fe, Mn et Zn), (iii) le relèvement du pH du sol (effet chaulant) et la réduction de la phytotoxicité aluminique, (iv) l'augmentation de la capacité de rétention d'eau dans le sol et (v) l'amélioration de la structure et de l'activité biologique du sol, stimulant une meilleure croissance des plantes.

L'objectif principal de cette recherche est de déterminer les effets d'application de la DRK finement broyée et de la PC sur les propriétés de charge de surface des sols sableux acides de l'hinterland de Kinshasa après 12 mois d'incubation *in vitro*. De

manière spécifique, l'étude a mis un accent particulier sur (i) l'effet de la DRK et de la PC sur les propriétés indicatrices de la fertilité chimique des sols (PIFC : pH, CO, Nt, SB, CEC), (ii) les propriétés de la charge électrique des sols et leur évolution en fonction du temps d'incubation et (iii) les différentes corrélations linéaires et exponentielles entre les composantes de charge et certaines PIFC des sols.

MATERIEL ET METHODES

Sols

L'environnement physiographique de l'hinterland de Kinshasa ainsi que certaines propriétés fondamentales des sols ont été largement décrits par [KASONGO et al. \[2009\]](#). Les sols de l'hinterland de Kinshasa sont classifiés comme Orthic Régosol selon le système Canadien de classification des sols [[VANDENBYGAART, 2011](#)], Rubique Ferrallique Arénosol (Dystrique) selon le système de classification WRB [[WRB, 2006](#)], et comme Quartzipsamment Ustoxique Isohyperthermique conformément au système américain de classification des sols [[SOIL SURVEY STAFF, 2010](#)]. La composition granulométrique moyenne de la couche arable (0 - 25cm) des sols des Batéké est de 3 % argile, 6 % limon et 91 % sable, avec une densité apparente de l'ordre de 1,25 g. cm⁻³. La pluviométrie moyenne de l'hinterland de Kinshasa varie de 1300 à 1500 mm, avec une répartition bimodale inégalement répartie le long de l'année. L'échantillonnage a été entrepris dans deux sites sous savane naturelle (16°09'20"E, 04°32'16"S, ± 658 m asl : site 1, et 16°18'02' E, 04°20'01"S, ± 9580 m asl : site 2), situés au nord-est de Kinshasa à 150 km, proche de la route Kinshasa-Kikwit. Cinquante échantillons (25/site) de la couche arable (0-25 cm) ont été prélevés de manière aléatoire dans une superficie d'environ 25 ha puis soigneusement mélangés et un échantillon composite a été obtenu par la méthode de quartage [[ALLMAN ET LAWRENCE, 1972](#)]. Ce mélange d'échantillons de deux sites permettrait de tirer l'acidité du premier site (pH -H₂O 5,07) vers celle du deuxième site (pH-H₂O 5,26). Ce sol qualifié de sol initial est caractérisé par les propriétés physico-chimiques suivantes: pH-H₂O=5,16 ; CEC=3,0 cmol_c.kg⁻¹ ; carbone organique 0,83% ; azote total 0,05% ; somme des cations basiques 0,4 cmol_c.kg⁻¹ ; saturation en bases 14% et Al extrait 1,35 cmol_c.kg⁻¹ caractérisant un taux de saturation en Al de l'ordre de 77% par rapport à la CEC effective (CECE : somme des cations basiques échangeables et de l'Al extrait). Ces valeurs confirment davantage le faible niveau de fertilité des sols de l'hinterland de Kinshasa.

Amendements

Dolomie rose de Kimpese

Ce sont des formations appartenant au groupe schisto-calcaire de Kwilu, constituées d'une couche de dolomie se présentant sous forme d'un banc de plus de deux mètres d'épaisseur, de teinte rose, finement interstratifiée à litage plan

et à débit en plaquettes. Le groupe schisto-calcaire de Kwilu constitue l'une des grandes unités géologiques de la province de Kongo central. L'échantillonnage de la roche dolomitique a été pratiqué dans la carrière de « Safricas » située à l'ouest de Kimpese, province du Kongo central. Les échantillons prélevés ont été concassés, broyés et tamisés à l'aide de concasseur Fritsch, de broyeur Sciebtchnik et d'un système de tamisage ultrasons. La fraction fine (< 100 µm) a été utilisée comme amendement des sols dans l'expérimentation d'incubation conduite *in vitro*. L'analyse minéralogique par diffraction X [[DE CONINCK et al., 1986](#) ; [BAERT, 1995](#)] et par observation microscopique (lames minces) révèle que la dolomie rose de Kimpese possède dans sa fraction cristallisée, une composition minéralogique dominée par la dolomite, la calcite et le quartz en faible proportion. La composition chimique élémentaire de cette roche dolomitique indique bien qu'il s'agit d'un calcaire dolomitique ([Tableau 1](#)) avec un équivalent en carbonate de calcium (ECC) d'environ 85 %, un excellent matériel de chaulage agricole. La dose d'application de la dolomie a été calculée conformément à la méthode de [KAMPRATH \[1970\]](#) : 1 cmol_c Al échangeable = 1,5 cmol_c Ca = 1,65 t. ha⁻¹ d'équivalent en carbonate de calcium (ECC). La dose ainsi calculée est de 2,73 t.ha⁻¹, soit 874 mg (kg sol)⁻¹. Pour l'essai *in vitro* proposé, le double de cette dose calculée a été utilisé, soit 5,46 t.ha⁻¹.

Parche de café

Les déchets du café (parche de café) ont été récoltés à l'usine de traitement de café (Office Congolais du Café), Kingabwa-Limete, province de Kinshasa à environ 500 mètres de la route appelée "Poids lourds". Les échantillons ont été séchés à l'air puis ultérieurement broyés selon les exigences de l'analyse considérée. Les éléments minéraux de la parche de café ont été déterminés suivant les protocoles décrits par [VAN RANST et al. \[1999\]](#) : minéralisation complète de l'échantillon par calcination à 450 °C suivie d'une digestion des cendres obtenues dans l'acide nitrique 6 M. Les éléments Fe, Al, Mn, Ca, Mg, K, et Na dans cet extrait nitrique ont été dosés par absorption atomique (AA) (Varian SpectrAA-600, Varian Australia Pty Ltd, Mulgrave, VIC, Australia), alors que le phosphore et le titane ont été déterminés par colorimétrie (UV- VIS 1205 Spectrophotometer). La teneur en azote et en carbone a été déterminée par spectroscopie de masse (SM), au moyen d'un analyseur élémentaire (EA: elemental analyser) couplé à un spectromètre de masse à rapport isotopique (IRMS: Isotopic Ratio Mass Spectrometer; ANCA – SGL_20 – 20, SerCon, UK). L'échantillon de la parche était utilisé à l'état solide sans traitement préliminaire spécifique et en deux essais. Le système était calibré au moyen des standards PDP (Pee Dee Belmnite) pour le carbone (¹³C) et l'air pour l'azote (¹⁵N). Les tanins condensés (polyphénols) ont été dosés par la méthode colorimétrique de Folin-Denis selon les protocoles décrits par [JOSLYN \[1970\]](#). Cette méthode est basée sur la réduction de l'acide phosphomolybdique et tungstique en milieu alcalin, en

présence de tanins pour donner une coloration bleue dont l'intensité est mesurée à 760 nm sous 1 cm d'épaisseur. A cet effet, les tanins ont été dosés par colorimétrie (UV- VIS 1205 Spectrophotometer). Les fractions fibreuses (lignine, celluloses et hémicelluloses insolubles dans l'eau) ont été estimées par la procédure séquentielle de VAN SOEST *et al.* [1991]. L'eau libre (H_2O) et la perte au feu (H_2O^+) ont été déterminées par chauffage à 110 et 1000 °C, respectivement. Le pouvoir chaulant (équivalent en carbonate de calcium) de la parche de café a été déterminé conformément à la méthode proposée par ERICH ET OHNO [1992].

Les propriétés chimiques des amendements (Tableau 1) indiquent clairement que la PC est un fumier organique riche en azote, phosphore et potassium (engrais NPK) et doté d'un pouvoir chaulant susceptible de corriger l'acidité des sols tropicaux pauvres et acides. La DRK est dotée d'une composition chimique typique pour un matériel chaulant par excellence pouvant s'avérer très efficace pour la correction de l'acidité des sols sableux de l'hinterland de Kinshasa. Dotée d'une teneur élevée en Ca et Mg, la DRK peut vraisemblablement restaurer le complexe adsorbant des sols acides en cations basiques et, par conséquent, augmenter sensiblement le taux de saturation en bases.

Dispositif expérimental et incubation des sols

Les traitements expérimentaux ont consisté en l'application de 20 t.ha⁻¹ de la PC et de 5,46 t.ha⁻¹ de la DRK correspondant à 6,4 g PC. (kg sol)⁻¹ et à 1748 mg DRK. (kg sol)⁻¹, respectivement. Un échantillon témoin n'ayant reçu aucun amendement a été ajouté parmi les traitements. Chaque traitement a été appliqué en 6 répétitions, l'ensemble ayant été complètement randomisé. Pour l'expérimentation d'incubation proposée, 400 g de sol séché à l'air et tamisé à 2 mm ont été intimement mélangés avec une quantité d'amendement prédéterminée. Le mélange sec a été quantitativement transféré dans un cylindre PVC de 20 cm de hauteur avec un diamètre intérieur de 5,0 cm dont la base inférieure a reçu un morceau d'ouate. Les éprouvettes ont été posées sur des entonnoirs en plastique, puis placées dans une boîte en bois (confectionnée à cet effet) à 2 étagères et des flacons blancs en polyéthylène, placés sur l'étagère inférieure et fixés sous les cylindres, ont servi pour recueillir les percolats. Les sols étaient humectés à la capacité au champ (potentiel matriciel de - 33 kPa) avec de l'eau distillée et incubés pendant 12 mois au laboratoire où les moyennes des températures diurnes et nocturnes étaient de 26 et de 18 °C, respectivement. Une quantité totale de 560 ml d'eau distillée (environ 87 % des précipitations moyennes trimestrielles dans l'hinterland de Kinshasa) a été ajoutée pendant le premier trimestre, à raison de 46,7 ml chaque semaine. A l'issue de ces trois premiers mois, l'expérimentation a été arrêtée, les sols ont été séchés à l'air, soigneusement homogénéisés. Un échantillon d'environ 50 g a été prélevé dans chaque colonne pour la détermination (i) des

propriétés indicatrices de la fertilité chimique du sol (pH, carbone organique, azote total, phosphore disponible, CEC et cations échangeables), et (ii) des propriétés de charge électrique des sols témoins et amendés. Les percolats obtenus dans des flacons en plastique ont été retirés régulièrement après chaque percolation et conservés au réfrigérateur pour l'étude du bilan hydrique et de lessivage des cations et ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques [KASONGO *et al.*, 2010 ; 2011 et 2012].

Ensuite, pour poursuivre l'expérimentation, le sol a été pesé de nouveau, remis dans le cylindre (environ 350 g au 2^e trimestre) et un nouvel apport hebdomadaire en eau distillée a été réalisé durant un trimestre, après que le sol ait été humecté à la capacité au champ. Cette opération a été répétée pendant 12 mois.

Tableau 1. Propriétés chimiques des amendements

Parche de café		Dolomie rose de Kimpese	
Propriété	Valeur	Propriété	Valeur
pH-H₂O	8,0 ±0,3	pH-H₂O	10,5±0,7
ECC (%)	17,7±0,4	ECC (%)	84,7±0,39
Humidité (%)	8,4	SiO₂ (%)	6,4
Matière sèche	91,4	Al₂O₃ (%)	1,55
Ca (%)	0,37	Fe₂O₃ (%)	0,79
Mg (%)	0,14	TiO₂ (%)	0,18
K (%)	2,49	MnO (%)	0,04
Na (%)	0,04	CaO (%)	30,25
P (%)	0,08	MgO (%)	16,99
Mn (%)	0,01	Na₂O (%)	0,64
Al (%)	0,58	K₂O (%)	0,09
Fe (%)	0,29	P₂O₅ (%)	0,16
Carbone (%)	44,9±0,50	H₂O⁻ (eau libre %)	0,12
Azote (%)	1,69±0,03	H₂O⁺ (perte en feu)	42,57
Lignine (%)	28,6		
Celluloses (%)	30,4		
Hémicelluloses (%)	14,9		
Tanins (polyphénols %)	0,4		
C/N	27		
Lignine/N	17		
Celluloses/N	18		

ECC: équivalent en carbonate de calcium

L'apport hebdomadaire en eau distillée pour le premier trimestre a été estimé aux deux-tiers du volume ajouté pour amener le sol à la capacité au champ (~ 70 ml), et a été recalculé le trimestre suivant tenant compte de la nouvelle capacité au champ du sol restant dans le cylindre. La masse de sol contenue dans le cylindre et pesée à chaque trimestre, a été prise en compte dans les calculs des propriétés physicochimiques déterminées.

Méthodes analytiques

Les analyses des sols ont été réalisées, suivant les procédures standard, sur la terre fine (<2 mm) des échantillons séchés à l'air. Les analyses concernant le pH (extraits H₂O et KCl, rapport 1 : 2,5), le carbone organique (méthode de Walkley et Black), l'azote total (méthode de Kjeldahl), le phosphore extractible avec la méthode Bray 2, la capacité d'échange cationique (CEC₇) et les cations basiques (percolation à l'aide de NH₄OAc 1M, pH 7,0) ont été effectuées conformément aux protocoles décrits par VAN RANST *et al.* [1999]. L'acidité d'échange (H⁺ + Al³⁺) a été déterminée dans la solution obtenue après traitement de la terre avec une solution de KCl 1M.

Les propriétés de charge (pH du sol en utilisant CaCl₂ 0,002 M, pH₀ et courbes de charge) ont été déterminées par la méthode de "charge fingerprint" proposée par UEHARA ET GILLMAN [1980], puis modifiée par GILLMAN ET SUMPTER [1986] et GILLMAN [2007]. Pour la détermination du pH₀, deux grammes de sol sec et tamisé à 2 mm sont saturés en Ca et portés à l'équilibre avec la solution de CaCl₂ 0,002M. Le pH est ajusté aux différentes valeurs dans la gamme de 3 à 7. Après stabilisation, le pH est mesuré et désigné pH_{0,002}. Le même échantillon de sol est ensuite porté à l'équilibre avec la solution de CaCl₂ 2M, puis le pH est de nouveau mesuré après stabilisation et appelé pH_{0,05}. La variation du pH (Δ pH), calculée par la différence entre pH_{0,05} et pH_{0,002} (Δ pH = pH_{0,05} - pH_{0,002}) est représentée graphiquement en fonction du pH_{0,002}, et le pH₀ est le point d'intersection de la droite obtenue avec l'axe des pH_{0,002}, c'est-à-dire le point de cette droite pour lequel Δ pH est nul (abscisse à l'origine). Concernant la détermination de la variation des charges négatives et positives en fonction du pH (courbes de charge), le sol est de nouveau saturé de Ca et porté à l'équilibre avec la solution de CaCl₂ 0,002M. Le pH est ajusté aux différentes valeurs de 3 à 7, et après stabilisation, une solution NH₄NO₃ 1M a été utilisée pour l'extraction des ions adsorbés (Ca, Al et Cl). Ca et Al ont été dosés par absorption atomique (Varian SpectraAA-600, Varian Australia Pty Ltd, Mulgrave, VIC, Australia), alors que Cl a été déterminé par titrimétrie (Chloride Analyser 926, Corning Limited, Halstead, UK). Les quantités d'ions adsorbés sont représentées par : CECB (Ca_{ads}), CECT (Ca+Al)_{ads}, et CEA (Cl)_{ads}.

Analyse statistique

L'analyse de la variance (ANOVA), effectuée avec le logiciel SPSS 19, a été utilisée pour déterminer les effets d'application de

la DRK finement broyée et de la PC sur les propriétés indicatrices de la fertilité des sols étudiés. Le test de la plus petite différence significative (LSD = least significant difference) a été utilisé pour détecter les différences entre les valeurs moyennes des traitements à la probabilité $p < 0,05$. Les coefficients de corrélation de Pearson ont été calculés pour déterminer le degré de corrélation entre les caractéristiques choisies.

RESULTATS ET DISCUSSION

Impact de la DRK et de la PC sur les propriétés indicatrices de la fertilité chimique des sols des Batéké

Les caractéristiques chimiques liées à la fertilité des sols du plateau des Batéké, après 12 mois d'incubation avec la PC et la DRK sont résumées dans le Tableau 2. La Figure 1 montre l'évolution en fonction du temps d'incubation, du taux de saturation en bases (T), du pH_{H₂O}, de la somme des bases (SB) et de la capacité d'échange cationique (CEC), respectivement.

Acidité

En général, l'ANOVA a mis en évidence une différence significative ($p < 0,05$) entre le pH des différents traitements. Tous les sols amendés sont caractérisés par un pH (H₂O) significativement supérieur à celui du témoin pendant toute la durée de l'expérimentation, alors que le pH du témoin est resté inférieur à 5,5, indiquant vraisemblablement la présence des substances toxiques (Al³⁺, Mn²⁺) pour les cultures dans les sols de l'hinterland de Kinshasa. L'effet chaulant induit par les amendements a augmenté sensiblement le pH de 1,3 unité pour la PC et de 1,6 pour la DRK au deuxième cycle d'incubation, avec des valeurs nettement supérieures à 5,5 traduisant la neutralisation de la toxicité aluminique et manganique des sols étudiés. En ce qui concerne l'évolution de l'acidité des sols en fonction de la durée d'incubation, l'étude révèle que la DRK produit une neutralisation plus prononcée au cours de deux premiers cycles d'expérimentation, alors que la PC produit un effet bénéfique plus persistant pendant toute la durée de l'expérimentation (Figure 1). De plus, l'étude montre clairement que tous les traitements considérés sont caractérisés par une différence (pH_{KCl} - pH_{H₂O}) nettement inférieure à zéro, indiquant que les sols des Batéké sont dotés des colloïdes à charge négative [KUMAR ET SANJIB, 2020]. La neutralisation de l'acidité du sol due à l'application de la DRK est certainement le résultat de la solubilisation de la calcite (CaCO₃) et de la dolomite (CaMg(CO₃)₂) dans le sol, conformément au mécanisme proposé par VAN STRAATEN [2007] et à celui décrit par SHAMSHUDDIN [2001]. En effet, après dissociation de ces deux minéraux dans le sol suivie de l'hydrolyse de carbonate (production des ions OH⁻), les H⁺ produits par la substitution des ions Ca²⁺ et Mg²⁺ sur le complexe d'adsorption, sont ainsi neutralisés par les ions OH⁻ provenant de l'hydrolyse de CO₃²⁻.

Tableau 2. Evolution en fonction du temps d'incubation, des propriétés indicatrices de la fertilité des sols de l'hinterland de Kinshasa amendés à la parche de café (PC) et à la Dolomite rose de Kimpese (DRK)

Temps d'incubation	Traitement	pH		%		C/N	P _{disponible}			cmolc.kg ⁻¹				T (%)
		H ₂ O	KCl	CO	N _t		Mg/kg	Ca	Mg	K	Na	SB	CEC	
3 mois	T	5,36a	4,35a	1,06a	0,063a	17b	16a	0,3	0,14a	0,02a	0,00a	0,46a	3,11a	15a
	PC	6,05b	4,65b	1,39b	0,105b	13a	18ab	0,76	0,30b	0,29b	0,02a	1,37b	4,95b	28a
	DRK	6,34c	5,35c	1,18ab	0,080a	15b	17a	1,73	0,90c	0,05a	0,04b	2,72c	5,25c	52a
	CV(%)	9,4	10,5	8,7	19,3	13	15	51	35	71	29	38,5	12,3	30,5
6 mois	T	5,35a	4,32a	1,00a	0,057a	18b	14a	0,31	0,15a	0,03a	0,01a	0,0a	3,20a	16a
	PC	6,67b	5,26b	1,50b	0,114b	13a	22c	1,24	0,30b	0,33b	0,03a	1,90b	5,84b	33b
	DRK	6,91c	5,92c	1,15a	0,076a	15b	19a	3,41	1,13c	0,07a	0,03a	4,64c	6,55c	71c
	CV(%)	10,3	6,7	7,8	18,5	14	17	48	31,5	80	30,3	40,2	12	28,5
9 mois	T	5,36a	4,30a	1,01a	0,053a	19b	15a	0,28	0,14a	0,03a	0,02a	0,47a	3,18a	15q
	PC	6,69b	5,58b	1,55b	0,119b	13a	23b	1,49	0,29b	0,33b	0,02a	2,14b	6,11b	35b
	DRK	6,77b	5,75b	1,00a	0,067a	15b	18a	2,62	0,80c	0,05a	0,03a	3,50c	6,09b	58c
	CV(%)	5,8	6,9	8	15,7	15	18	35,3	25,3	81,2	30	32,1	15,7	31,2
12 mois	T	5,31a	4,34a	1,02a	0,055a	19b	14a	0,26	0,11a	0,03a	0,01a	0,41a	3,17a	13a
	PC	6,63b	5,35b	1,62b	0,126b	13a	21b	1,6	0,31b	0,40b	0,04a	2,35b	6,25c	38b
	DRK	6,33ab	5,28b	1,02a	0,060a	17b	16a	2,26	0,71c	0,08ab	0,03a	3,08c	5,43b	57c
	CV(%)	7,5	8	10	18,5	12	17,5	35,5		80,2	31,1	31,1	14,3	33,5

Les moyennes suivies de la même lettre au sein d'une colonne sont statistiquement identiques au seuil de probabilité $p < 0,05$; CV = coefficient de variation (%).

La teneur relativement élevée en éléments minéraux dans la PC, notamment celle en K^+ (Ca^{2+} dans une certaine mesure, [Tableau 1](#)) serait vraisemblablement le facteur générateur de l'effet chaulant associé à l'application de ce fumier organique dans les sols de l'hinterland de Kinshasa. Les investigations de [YAN et al. \[1996\]](#) ont montré que la décarboxylation des anions organiques contenus dans les fumiers organiques produit la consommation des protons (H^+) et la libération de CO_2 . De plus, les résultats de [HUE ET AMIEN \[1989\]](#) et de [QAFOKU et al. \[2004\]](#) ont montré que les amendements organiques appliqués aux sols tropicaux acides réduisent l'acidité du sol par formation des complexes organo-aluminiques. Ceci se traduit par une augmentation sensible de la teneur en azote totale et en carbone organique [[HAYNES ET MOKOLOBATE, 2001](#)].

Matière organique

Selon [DUCHAUFOR \[2004\]](#), la matière organique (MO) du sol joue un rôle fondamental dans le fonctionnement du sol. Son mélange intime avec la fraction argileuse constitue ce qu'on appelle communément le complexe argilo-humique ou complexe d'adsorption ou encore complexe d'échange du sol. Les résultats obtenus concernant le carbone organique (CO) et l'azote total (Nt) sont consignés dans le [Tableau 2](#). En général, l'ANOVA a mis

en évidence une différence significative à la probabilité $p < 0,05$ entre les sols amendés de la PC et les autres traitements. L'application de la DRK n'a pas produit de différence significative par rapport au témoin. L'augmentation concomitante de la teneur en azote et en carbone organique induite par l'application de la PC s'est soldée par une diminution du rapport C/N jusqu'au niveau optimal (10-14), améliorant ainsi la qualité de la MO des sols de l'hinterland de Kinshasa pendant toute la durée de l'expérimentation. Les teneurs en CO et en Nt dans les sols amendés de PC sont significativement supérieures à celles de traitements témoins ($P < 0,05$). En effet, l'application de $20 t \cdot ha^{-1}$ de PC augmente le carbone organique du sol (COS) de 31% (1^{er} cycle) à 59 % au dernier cycle d'incubation, alors que l'Nt a augmenté de 67 à 129 % dans les sols amendés par rapport aux témoins. Une augmentation significative de pH allant jusqu'à plus d'une unité (1,0) de pH ([Tableau 2](#)) induite par l'application de ce fumier organique serait le résultat de l'amélioration sensible de la minéralisation en N et C.

Phosphore extrait par la méthode Bray 2

L'évolution, en fonction de la durée d'incubation (cycle d'incubation), de la teneur en phosphore extrait par la méthode Bray 2 dans les sols amendés de DRK et de PC est présentée dans [Tableau 2](#).

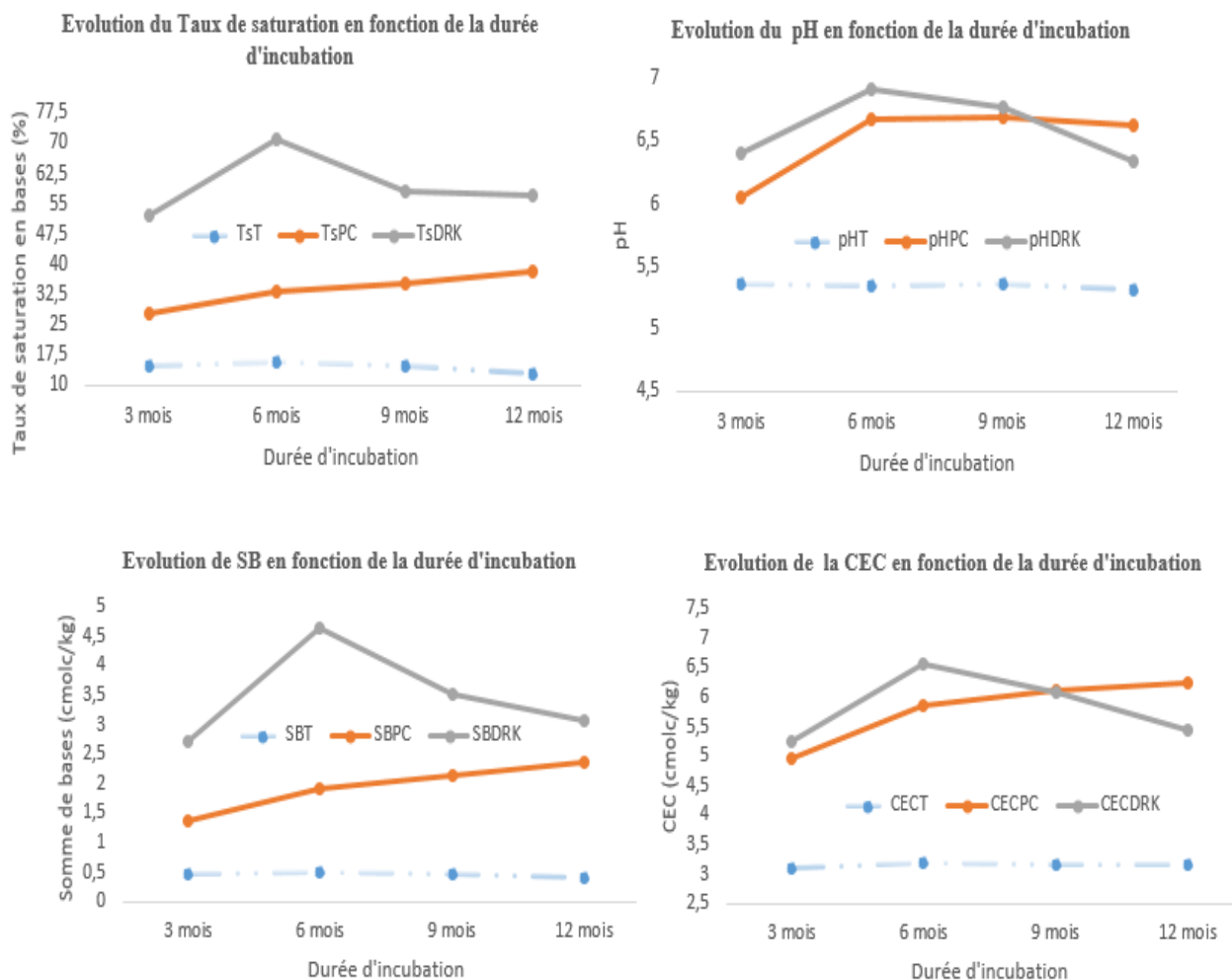


Figure 1. Evolution en fonction du temps d'incubation, des propriétés indicatrices de la fertilité chimique des sols de l'hinterland de Kinshasa (pH, CEC, somme des bases (SB) et taux de saturation en bases (T)).

Il s'avère que les teneurs en P extrait sont significativement différentes ($p < 0,05$) mais temporairement, avec les valeurs maximales au deuxième cycle (36 %) pour les sols amendés de DRK et au troisième cycle (53 %) pour sols traités avec la PC. La solubilisation progressive de la DRK et de la PC pendant l'incubation des sols, combiné à l'accroissement du pH induit par leur effet chaulant, sont des facteurs qui auraient contribué à l'augmentation de la disponibilité en phosphore dans les sols étudiés. Cependant, l'augmentation du pH du sol au-dessus de la valeur 5,5 provoque généralement la précipitation de l'Al et augmente ainsi la teneur en phosphore disponible dans le sol [LANDON, 1991 ; VAN STRAATEN, 2007]. De plus, la teneur en P contenu dans la PC (0,08 %, Tableau 1) combinée à la forte dose d'application dans ce fumier organique aurait contribué dans une certaine mesure, à l'augmentation de la disponibilité de P dans les sols amendés de PC. Une amélioration significative de phosphore mobile par application des fumiers organiques aux sols acides a été observée par IYAMUREMYE ET DICK [1996] et MATERECHERA ET MKHABELA [2002]. Ceci a été attribué à la diminution de la capacité d'adsorption de P du sol, suite à l'accroissement du pH ou au blocage des sites d'adsorption des

colloïdes du sol par les molécules organiques et/ou au P inorganique libéré lors de la décomposition du fumier organique. Cette étude démontre clairement que l'application de la PC, contenant des oxydes libres de Ca, Mg, K et Na augmente le pH des sols au-dessus de 5,5 et produit les nutriments requis pour l'alimentation des plantes.

CEC et cations échangeables

La capacité d'échange cationique (CEC), les cations d'échange ou cations basiques échangeables, la somme des cations basiques échangeables (SB) et le taux de saturation en bases (T) sont résumés dans le Tableau 2. L'évolution, en fonction de la durée d'incubation, de la CEC, de la SB et du T est montrée à la Figure 1. En ce qui concerne la présence des cations sur le complexe d'adsorption, l'ANOVA a mis en évidence des différences significatives entre les traitements pour le Ca, Mg et K, alors que les teneurs en Na échangeable des sols amendés de DRK et de PC sont statistiquement identiques ($p < 0,005$) à celles des sols témoins. L'étude révèle que l'application de 5,46 t.ha⁻¹ de DRK finement broyée a produit, après 6 mois d'incubation, des accroissements d'au moins 1000 et 650 % pour le Ca et le Mg,

respectivement. L'étude révèle également que pendant toute la durée de l'expérimentation, l'application de DRK finement broyée, produit des teneurs en K statistiquement identiques à celles des témoins, alors que l'application de 20 t.ha⁻¹ de PC, a produit des teneurs en K significativement ($p < 0.05$) supérieures à celles des témoins et des traitements de DRK. La provision de la DRK en Ca et Mg est justifiée par la composition chimique de cet amendement en éléments minéraux (Tableau 1) et, la solubilisation progressive des minéraux (dolomite et calcite) de DRK dans le sol produit des ions Ca²⁺ et Mg²⁺ qui alimentent le complexe d'échange des sols amendés. La teneur relativement élevée de PC en K (2,49 %) (Tableau 1) et la dose d'application utilisée dans cette étude constituent des facteurs qui ont contribué à l'augmentation significative de la teneur en K dans les sols amendés. L'étude montre clairement que les amendements utilisés améliorent significativement le statut agricole des sols de l'hinterland de Kinshasa. Toutefois, l'étude relève que les rapports Ca/Mg/K obtenus, 74/24/2 pour DRK et 66/16/18 pour PC après 6 mois d'incubation, s'éloignent nettement du rapport optimal (76/18/6) pour la croissance des plantes. Le mélange de DRK et PC dans les proportions requises s'avère indispensable pour la restauration de la balance cationique.

L'évolution en fonction du temps d'incubation, de la somme des SB des sols (Figure 1) indique bien que la SB des sols amendés de DRK et de PC est significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle du sol témoin pour toute la période d'incubation. L'application de DRK produit, après 6 mois d'incubation, une augmentation d'environ 788 % par rapport au témoin, puis diminue jusqu'à la fin de l'expérimentation où un accroissement significatif de 651 % a été obtenu (Figure 1 et Tableau 2). La diminution de la SB à partir du deuxième cycle d'expérimentation peut être attribuée au lessivage relatif des cations basiques (Ca, Mg et K) suite à la faible capacité de rétention de l'eau des sols étudiés [KASONGO *et al.*, 2010 et 2012]. La Figure 1 montre par contre, une évolution continue de la SB des sols amendés à la PC indiquant un effet bénéfique plus persistant par rapport à la DRK. Ceci est vraisemblablement le résultat du faible lessivage des cations échangeables dans le sol suite à l'accroissement de la capacité de rétention d'eau induite par l'augmentation de la teneur en matière organique du sol (MOS).

En ce qui concerne la capacité d'échange cationique (CEC) ou capacité de rétention des nutriments, l'ANOVA a mis en évidence la différence significative entre les sols amendés et le témoin. L'étude montre que l'application de DRK et de PC aux sols des Batéké produit, après 6 mois d'incubation, une augmentation significative ($p < 0,05$) de la CEC d'environ 105 et de 83 %, respectivement par rapport au témoin (Tableau 2). La Figure 1 montre que l'évolution de la CEC en fonction de la durée d'incubation pour les deux amendements est similaire à celle du pH et de la SB. L'augmentation du pH du sol due à l'effet chaulant

induit par l'application des amendements est le principal facteur ayant contribué à l'augmentation significative de la CEC. La forte corrélation linéaire positive trouvée entre la CEC et le pH du sol ($y = 0,55 x + 2,99$; $R^2 = 0,96$) confirme cette hypothèse. L'augmentation significative de la CEC suite à l'accroissement du pH de sol, a été cependant, mise en évidence sur d'autres types des sols tropicaux amendés des matériaux chaulant (minéraux et organiques) d'autres origines [OYA ET KHONDER, 1996 ; MATERECHERA ET MKABELA, 2002 ; OSSOM ET RHYKERD, 2008 ; GILLMAN *et al.*, 2001, 2002 ; KANYANKOGOTE *et al.*, 2005 ; ANDA *et al.*, 2009].

Taux de saturation en bases

La saturation en bases (T) est la proportion de la capacité d'échange cationique occupée par les cations basiques échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺), exprimée en pourcentage. Elle est souvent utilisée comme indicateur du niveau de la fertilité chimique des sols. Le taux de saturation a été obtenu en divisant la somme des bases par la CEC et en multipliant le résultat par 100. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 2 pour toute la période d'incubation des sols. La Figure 1 montre l'évolution en fonction du temps d'incubation, du T des sols amendés de DRK et PC.

L'ANOVA a mis en évidence une différence significative à la probabilité $p < 0,05$ entre les sols amendés et les témoins. Il s'avère que l'application de 5,46 t.ha⁻¹ de DRK finement broyée et de 20,0 t.ha⁻¹ de PC aux sols pauvres de l'hinterland de Kinshasa a augmenté significativement le T des sols d'environ 344 et 106 %, respectivement après 6 mois d'incubation. Ceci relève le niveau de fertilité des sols des Batéké de faible à élevé pour les sols amendés de DRK et de faible à moyen pour ceux traités avec la PC [LANDON, 1991]. Etant donné que le T et la SB sont des propriétés proportionnelles, les résultats obtenus révèlent : (i) une augmentation significative pour les traitements avec la DRK suivi d'une diminution graduelle jusqu'à la fin de l'expérimentation avec des valeurs significativement différentes du témoin et (ii) une augmentation continue jusqu'à la fin de l'incubation pour les sols amendés de PC, traduisant un effet bénéfique plus persistant pour ce fumier organique.

Effet des amendements sur les propriétés de charge électrique des sols de l'hinterland de Kinshasa

Les propriétés de charge électrique des sols amendés de 5,46 t.ha⁻¹ de DRK et de 20,0 t.ha⁻¹ de PC ont été déterminées sur les échantillons composites (constitués à partir d'un mélange d'échantillons : n=6). Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 3, et l'évolution en fonction de la durée d'incubation, des composantes de charge électrique (CEC_T, CEC_B, CEA, pH₀ et pH_{0,002}) de surface des sols est présentée dans les Figures 2a, b, c et d.

Tableau 3. Effet de l'application de 5,46 Mg.ha⁻¹ de la dolomie rose de Kimpese (DRK) et de 20,00 t.ha⁻¹ de la parche de café (PC) sur les propriétés de charge de surface des sols de l'hinterland de Kinshasa (RD Congo) après 12 mois d'incubation

Temps d'incubation	Traitement	cmol _c .kg ⁻¹			pH _{sol}		cmol _c .kg ⁻¹		
		*CEC _B	*CEC _T	*CEA	CaCl ₂ (0,002M)	pH ₀	DpH	SB ₇	CEC ₇
0 mois	SI	0,67	1,14	0,47	4,58	4,24	-0,34	0,41	3,01
3 mois	T	0,83	1,28	0,41	4,66	4,32	-0,34	0,46	3,11
	PC	2,24	2,24	0,32	5,88	4,22	-1,66	1,37	4,95
	DRK	2,85	2,85	0,06	6,2	4,46	-1,74	2,72	5,25
6 mois	T	0,81	1,3	0,45	4,68	4,3	-0,38	0,5	3,2
	PC	3,71	3,71	0,2	6,18	4,05	-2,13	1,9	5,84
	DRK	5,41	5,41	0,13	6,5	4,36	-2,14	4,64	6,55
9 mois	T	0,79	1,28	0,46	4,7	4,33	-0,37	0,47	3,18
	PC	4,03	4,03	0,2	6,2	3,95	-2,25	2,14	6,11
	DRK	4,55	4,55	0,12	6,35	4,4	-1,95	3,5	6,09
12 mois	T	0,77	1,22	0,44	4,66	4,36	-0,3	0,41	3,17
	PC	4,37	4,37	0,21	6,18	3,87	-2,21	2,35	6,25
	DRK	3,61	3,61	0,13	6,13	4,42	-1,71	3,08	5,42

* = charge déduite des courbes de charge par interpolation linéaire au pH du sol (pH0.002) ; SB₇ et CEC₇ = somme des cations basiques et capacité d'échange cationique déterminées par percolation à l'acétate d'ammonium (CH₃COONH₄ 1M), pH 7,0 ; DpH = (pH₀ - pH_{sol}) ; SI = sol initial

Point de charge zéro (pH₀)

Le pH₀ des sols tropicaux pauvres est une propriété clé dans l'étude de leur charge électrique étant donné que sa position sur l'échelle de pH, affecte sensiblement la capacité d'échange cationique et la capacité d'échange anionique (CEA) du sol. Selon le modèle développé par UEHARA ET GILLMAN [1981], le pH₀ joue un rôle capital dans l'ensemble des propriétés de charge des sols à charge variable. En effet, la charge variable négative étant égale à la charge variable positive au pH₀, toute charge résiduelle à ce point est qualifiée de charge permanente nette. La différence entre le pH₀ et le pH du sol, détermine le signe de la charge variable. Si pH < pH₀, la charge nette variable est positive et inversement, si pH > pH₀, cette charge nette variable est négative.

Déterminé par régression linéaire simple des valeurs de pH_{0,002} et celles de ΔpH (Tableau 3), le pH₀ des sols étudiés et amendés est inférieur au pH du sol dans chaque cas, indiquant la présence des colloïdes à charge variable négative dans les sols étudiés tel que révélée par la différence positive entre le pH-H₂O et le pH-KCl. De plus, le Tableau 3 révèle que les sols non amendés (sol initial et témoin) sont caractérisés par une valeur de pH₀ inférieure à 5,0, indiquant la présence d'une minéralogie argileuse dominée par des phyllosilicates 1:1 (kaolinite) et/ou des oxydes résiduels d'Al et de Fe, laquelle est combinée à la matière organique dans le complexe argilo-humique [XU et al., 2016].

Le Tableau 3 révèle également que l'application de 20,0 t.ha⁻¹ de PC aux Arénosols de l'hinterland de Kinshasa a produit, après 3, 6, 9 et 12 mois d'incubation, une réduction de pH₀ de l'ordre de 0,10 ; 0,25 ; 0,38 et 0,49 unité de pH, respectivement. L'application de la DRK finement broyée n'a pas réduit le pH₀ des sols de l'hinterland de Kinshasa. La réduction du pH₀ des sols amendés de PC peut être attribuée à l'accroissement significatif de matière organique (MO) induite par l'application de ce fumier organique. La MO caractérisée par le groupement carboxyle (-COOH) possède un faible pH₀ variant de 3,5 à 4,0, ce qui provoque la réduction du pH du sol par libération des protons et création des charges négatives supplémentaires, lorsqu'elle est appliquée aux sols ayant un pH₀ supérieur (sols à colloïdes dominés par la kaolinite, par exemple). L'impact de la MO sur la décroissance du pH₀ des sols tropicaux pauvres a été expérimentalement mise en évidence par plusieurs investigations scientifiques [VAN RANST et al., 1998 ; BONIAO et al., 2002 ; MOGHIMI et al., 2013].

Les travaux de recherche de GILLMAN [1985] ont révélé que le pH₀ des sols à charge variable décroît d'une unité de pH à chaque augmentation d'un pour cent (1 %) de MO. Ceci semble être le cas pour cette étude où un accroissement de 0,6 % de CO induit par l'application de PC a produit, après 12 mois d'incubation, une augmentation de pH₀ de l'ordre de 0,5 unité de pH. La forte corrélation négative obtenue entre la teneur en CO et le pH₀ (R² = 0,73, Figure 3a) soutient ces résultats expérimentaux.

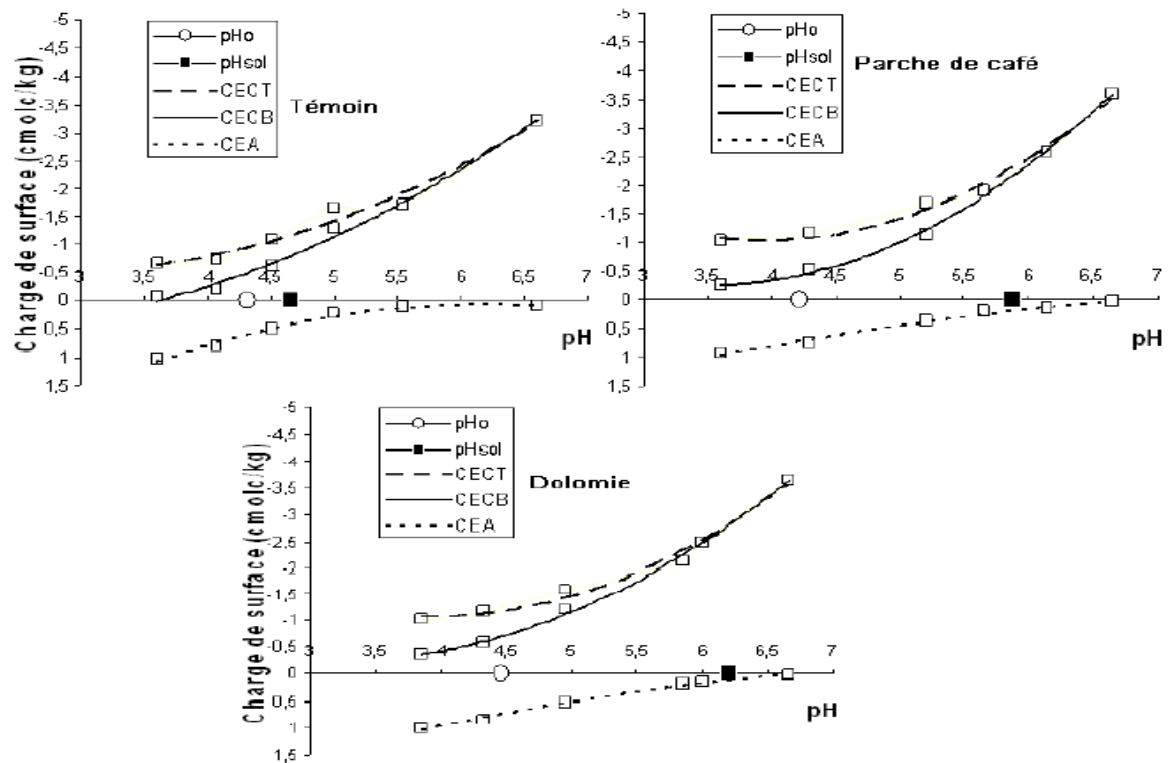


Figure 2a. Courbes de charge électrique des sols de l'arrière-pays de Kinshasa 3 mois après l'application de 20 t.ha⁻¹ de la PC et 5,46 t.ha⁻¹ de la DRK

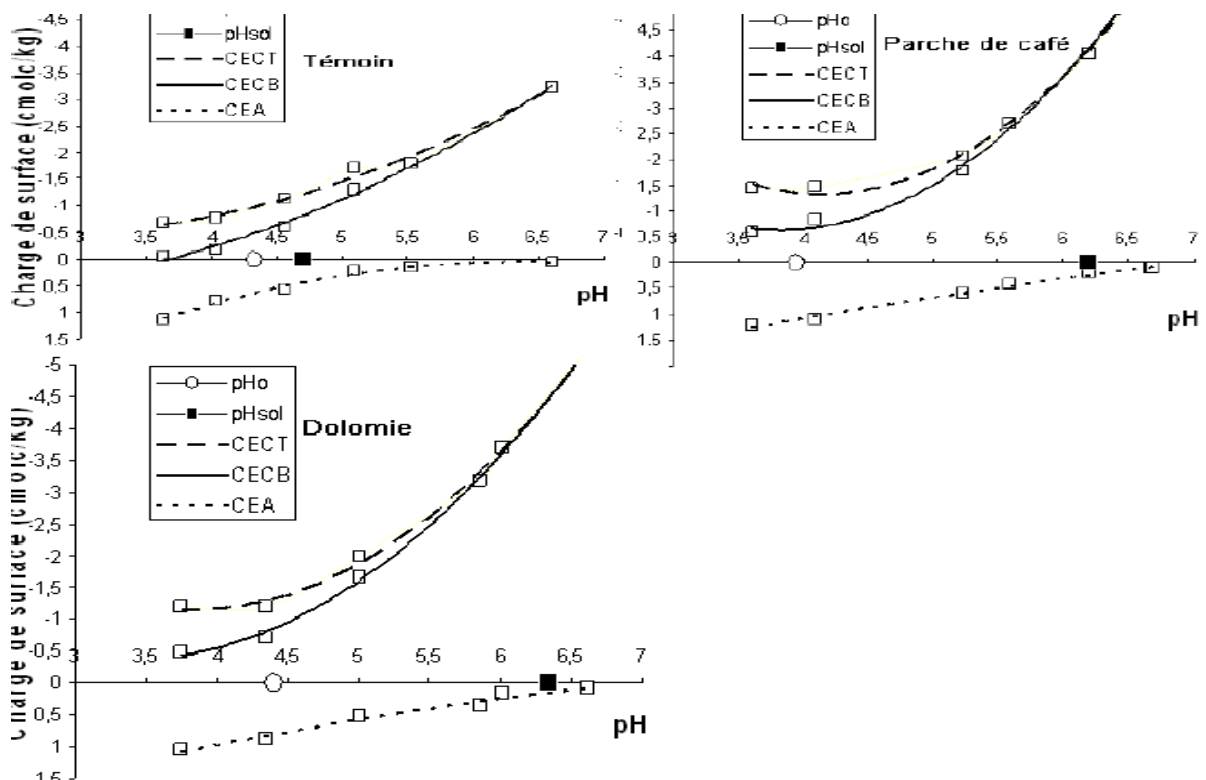


Figure 2b. Courbes de charge électrique des sols de l'arrière-pays de Kinshasa 6 mois après l'application de 20 t.ha⁻¹ de la PC et 5,46 t.ha⁻¹ de la DRK

Caractéristiques d'échange des cations et des anions

Les Figures 2a, b, c et d indiquent bien que les sols de l'arrière-pays de Kinshasa sont essentiellement à charge variable (charge dépendant du pH du sol) et que la composante négative

de charge (CEC_T ou CEC_B) augmente dans les sols amendés de DRK et de PC. Cependant, l'accroissement des charges négatives CEC_T et CEC_B est en réalité le résultat de l'augmentation du pH du sol induit par l'effet chaulant et/ou à la diminution du pH₀ associé à l'application des amendements. Le Tableau 3 montre bien qu'au pH du sol, l'application de 5,46 t.ha⁻¹ de DRK et de 20,0 t.ha⁻¹ de

PC relève sensiblement la charge négative CEC_T (CEC_B) des sols, après 6 mois d'incubation, de 1,22 $cmol_c.kg^{-1}$ (témoin) à 5.41 et 3,71 $cmol_c.kg^{-1}$, avec une diminution dramatique de la charge positive (CEA) de 0,45 $cmol_c.kg^{-1}$ (témoin) à 0,13 et 0,20 $cmol_c.kg^{-1}$, respectivement. Ceci correspond à une augmentation de la CEC_T de l'ordre de 343 % pour la DRK et d'environ 204 % pour les sols amendés de PC, avec une réduction de CEA

d'environ 71 % et 56 %, respectivement. Le **Tableau 3** révèle également une égalité des charges négatives CEC_T et CEC_B , due à la neutralisation de l'aluminium échangeable, au pH des sols amendés pendant toute la durée d'incubation, ce qui est très bénéfique du point de vue agricole pour l'élimination de la toxicité aluminique pour les cultures.

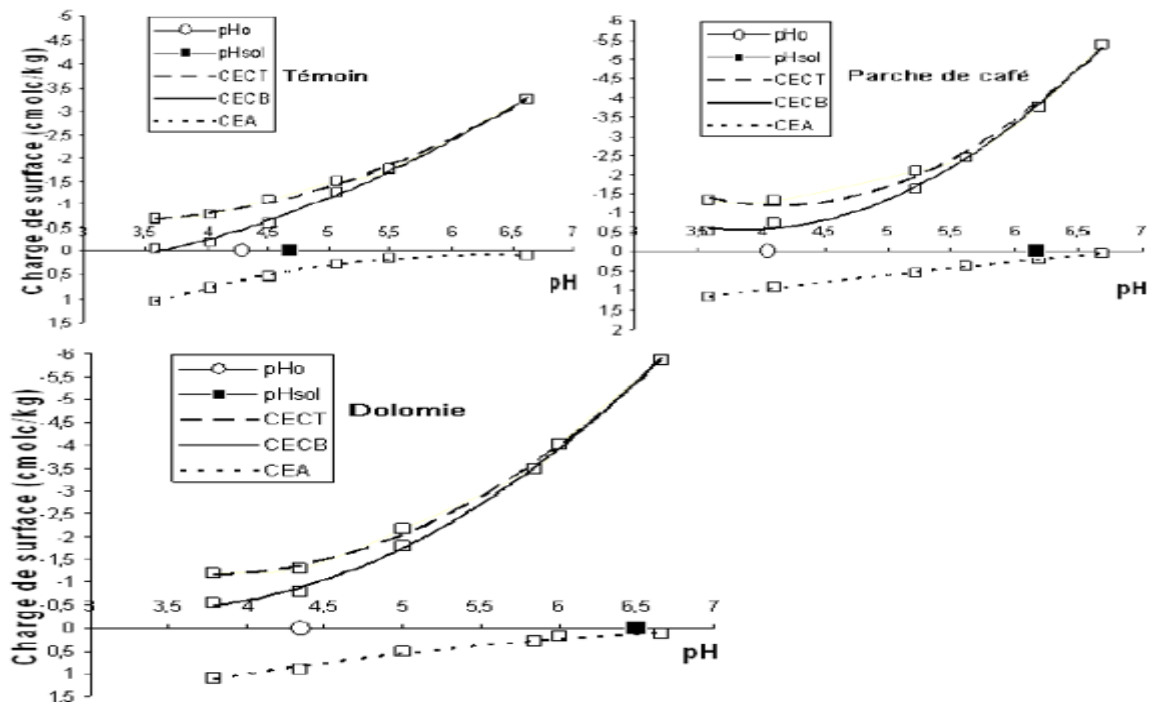


Figure 2c. Courbes de charge électrique des sols de l'hinterland de Kinshasa 9 mois après l'application de $20 t.ha^{-1}$ de la PC et $5,46 t.ha^{-1}$ de la DRK

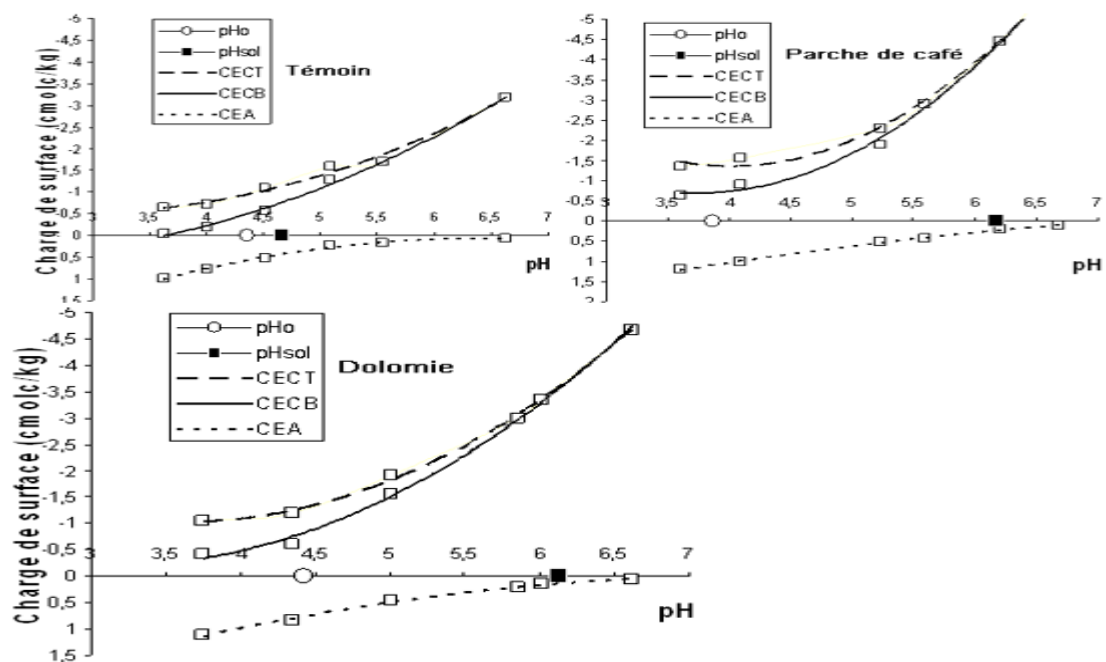


Figure 2d. Courbes de charge électrique des sols de l'hinterland de Kinshasa 12 mois après l'application de $20 t.ha^{-1}$ de la PC et $5,46 t.ha^{-1}$ de la DRK

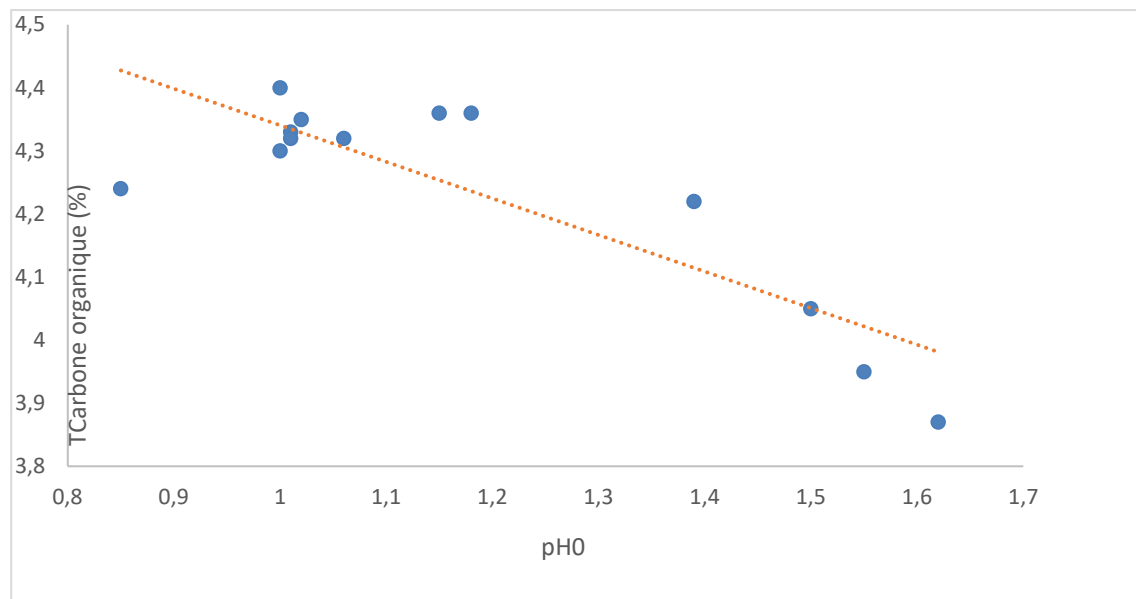


Figure 3a. Corrélation linéaire entre le carbone organique et le pH0

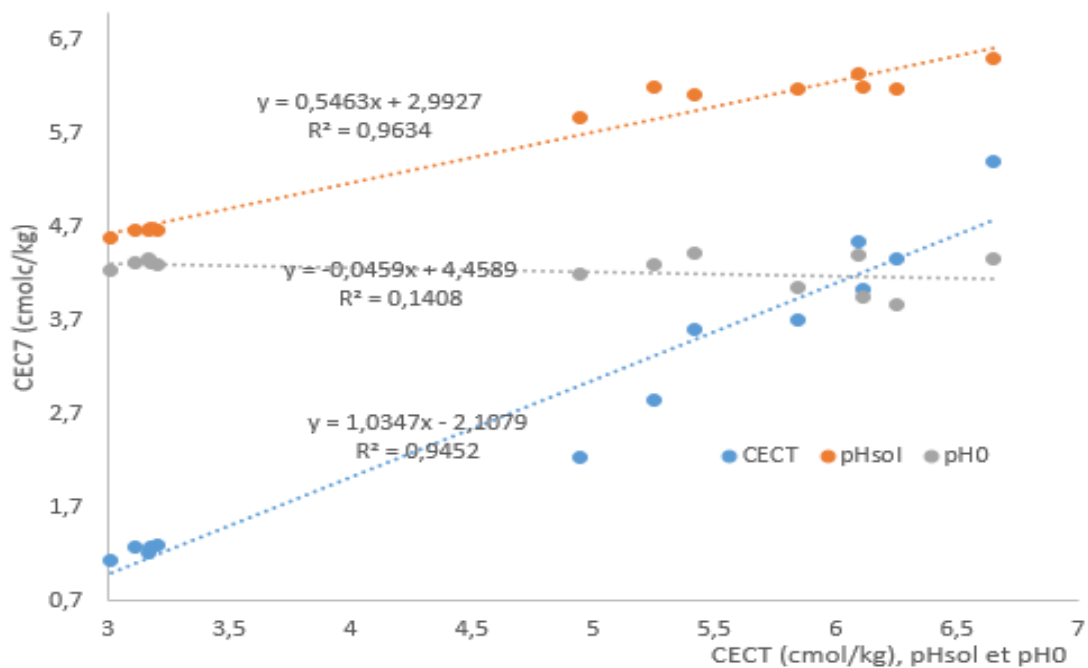


Figure 3b. Corrélations linéaires entre la CEC7 et les composantes de charge (CECT, pH0 et pH0,002) de l'arrière-pays de Kinshasa

En comparant la composante négative de la charge électrique des sols CEC_T (CEC_B) à la CEC_7 (et à la SB_7) (Tableau 3), il s'avère que (i) la CEC_7 obtenue par la méthode d'acétate d'ammonium pH 7.0 est sensiblement supérieure à la CEC_T au pH du sol, indiquant que la dernière procédure est mieux appropriée pour les sols tropicaux à charge variable, et (ii) la CEC_B au pH du sol est systématiquement plus élevée que la SCB_7 (somme des cations basiques extraits par la solution NH_4OAc , pH 7,0), signifiant que la CEC_B est certainement la quantité maximale de charges négatives susceptibles d'être neutralisées par des cations échangeables (acides et basiques). L'amélioration de charge électrique des sols tropicaux par application des matériaux

chaulant et/ou organiques a été prouvée expérimentalement [GILLMAN *et al.*, 2001 et 2002].

En considérant l'évolution des composantes de charge CEC_T , CEC_B et CEA (au $pH_{0,002}$) en fonction de la durée d'incubation (Tableau 3), l'étude montre que (i) la charge négative CEC_T (CEC_B) suit une tendance similaire à celle de la CEC_7 : une augmentation sensible de cette charge jusqu'au deuxième cycle d'incubation (valeur maximale) suivie d'une diminution progressive pour les sols traités avec la DRK, pendant que la charge négative des sols amendés de PC augmente continuellement jusqu'à la fin de l'expérimentation et, (ii) la charge positive CEA décroît

substantiellement tout au long de l'expérimentation pour tous les sols amendés par rapport aux témoins et au sol initial. La décroissance de la composante négative de charge CEC_T des sols amendés de DRK après avoir atteint le maximum (6 mois d'incubation) est vraisemblablement le résultat de la chute du pH [GILLMAN, 1981 ; QAFOKU *et al.*, 2004; KUMAR ET SANJIB, 2020] dans la même période d'incubation, due très probablement au lessivage des cations basiques [KASONGO *et al.*, 2010 et 2012].

L'augmentation continue de la charge CEC_T observée pour les sols traités avec la parche de café (PC) est attribuée à la décroissance du pH_0 induit par l'augmentation croissante de la teneur en carbone organique dans ces sols [GILLMAN, 1985 ; VAN RANST *et al.*, 1998 ; KASONGO *et al.*, 2010]. De plus, l'effet chaulant associé à l'application de ce fumier organique est un facteur qui a contribué à l'augmentation de la charge négative CEC_T dans les sols amendés de PC.

En ce qui concerne la relation entre les composantes de charge CEC_T et CEA et le pH, la Figure 3c révèle une relation exponentielle existant entre la charge totale négative (CEC_T) et positive (CEA), et la différence ($pH_0 - pH_{sol}$) des sols amendés et des témoins. L'équation de régression de cette relation est de la forme $y = a e^{b(pH_0 - pH_{sol})}$, où les facteurs a et b désignent respectivement, la charge au pH_0 et la pente de la courbe exponentielle. Il en résulte que la composante négative de charge CEC_T ou CEC_B est fortement ($p < 0,01$) corrélée ($R^2 = 0,94$; $y = 0,97 e^{-0,63x}$) avec la différence ($pH_0 - pH_{sol}$), alors que la composante positive (CEA) présente une corrélation $R^2 = 0,58 \leq 0,60$, indiquant que l'effet chaulant et/ou la réduction du pH_0 par les amendements ont plus stimulé le développement de la composante négative de charge (CECT), très probablement à cause des charges négatives supplémentaires produites par les amendements.

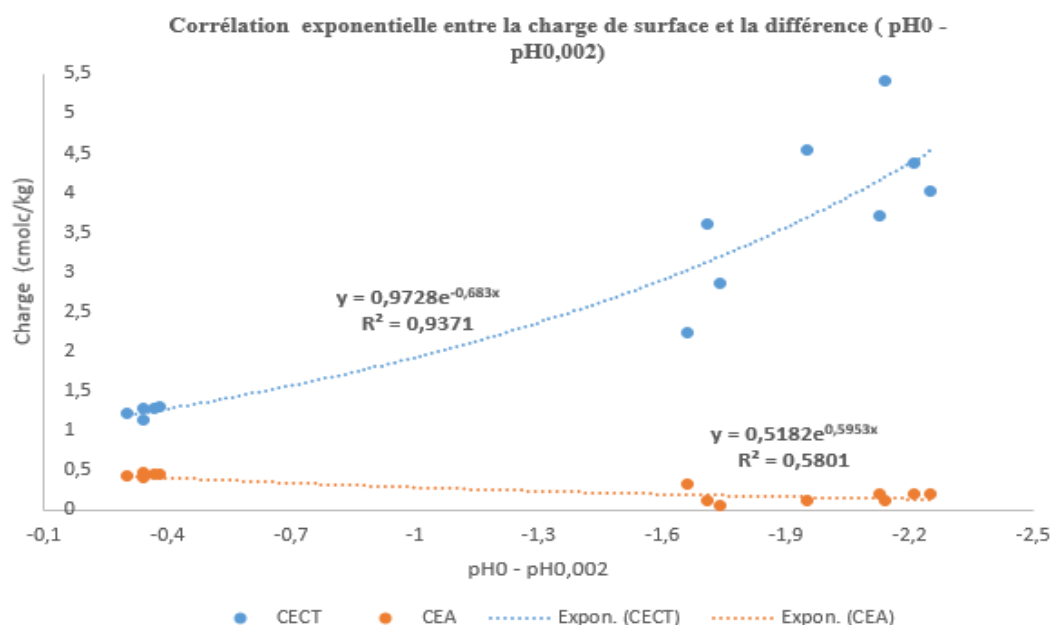


Figure 3c. Corrélation exponentielle entre la charge de surface et la différence ($pH_0 - pH_{0,002}$) des sols de l'hinterland de Kinshasa

L'analyse des charges électriques des sols montre clairement que l'application de la PC et de la DRK aux sols fortement altérés de l'hinterland de Kinshasa (i) augmente significativement le pH du sol, (ii) diminue sensiblement le pH_0 (sols amendés de PC) et (iii) augmente substantiellement les charges négatives CEC_B et CEC_T , collectrices des cations, avec une diminution concomitante de la charge positive CEA, collectrice des anions.

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche a permis de faire ressortir sur les moyen et long termes l'impact d'application de la dolomie rose de Kimpese (DRK) finement broyée et de la parche de café (PC), sur les propriétés de charge électrique des sols fortement altérés de l'hinterland de Kinshasa en région tropical humide. L'apport de la DRK et de PC a augmenté significativement les propriétés

indicatrices de la fertilité des sols : (i) le pH, (ii) le phosphore extractible par Bray 2 (PC), (iii) la somme des cations échangeables (SB), (iv) la CEC, (v) le taux de saturation en bases et (vi) a réduit voire éliminé la toxicité aluminique et manganique pour les cultures. De plus, l'étude révèle que la PC présente les propriétés d'excellent fumier organique et pourvoyeur des nutriments NPK. L'analyse des propriétés des charges a révélé que les sols des Batéké sont à charge essentiellement variable et que l'augmentation significative du pH et/ou la diminution du pH_0 induits par la DRK et la PC, a sensiblement augmenté les composantes négatives de charges CEC_B et CEC_T au pH du sol avec réduction dramatique de la charge positive CEA, collectrice des anions. L'étude montre clairement que la charge négative CEC_T (méthode charge Finger print) est systématiquement inférieure à la CEC_T (méthode d'acétate d'ammonium, pH 7,0) au pH du sol, indiquant que la CEC_T est mieux indiquée pour quantifier la

capacité de rétention des cations pour les sols tropicaux à charge variable. La DRK et la PC possèdent ainsi des potentialités requises pour améliorer à court, moyen et long terme les propriétés de charge électrique des sols fortement altérés de l'hinterland de Kinshasa.

RESUME

Les Arénosols de l'hinterland de Kinshasa sont caractérisés par une faible fertilité chimique, une capacité de rétention en eau très limitée, présentant une réaction acide avec toxicité aluminique et manganique pour les cultures et sont constitués par une composition minéralogique dominée par le quartz, la kaolinite et certains oxydes résiduels d'Al et de Ti. Les effets d'applications de la dolomie rose extraite à Kimpese (DRK) et de parche de café (PC) sur les propriétés de charge électrique des sols sableux des Batéké sous climat tropical humide ont été étudiés *in vitro*, suivant un dispositif expérimental complètement aléatoire. Des quantités de 6.4 g PC. (kg sol)⁻¹ et de 1748 mg DRK. (kg sol)⁻¹ correspondant sensiblement à 20,0 t(PC).ha⁻¹ et 5,46 t(DRK).ha⁻¹ finement broyée ont été mélangées avec des sols de surface (0-25 cm), puis incubées et lessivées pendant 3, 6, 9 et 12 mois. L'apport de DRK et PC au sol augmente significativement ($p < 0,005$) les propriétés indicatrices de la fertilité chimique des sols : (i) le pH (> 5,5), (ii) la disponibilité en phosphore (PC), (iii) la somme des cations basiques échangeables (SB : Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺), (iv) la teneur en carbone organique (CO) et en azote total (PC) et (vi) la capacité d'échange cationique (CEC) et le taux de saturation en bases. L'étude révèle que la PC est un excellent fumier organique et pourvoyeur des nutriments NPK pour les cultures. En étudiant les propriétés de charge des sols de l'hinterland de Kinshasa, il s'avère que l'apport de DRK et de PC : (i) augmente sensiblement le pH_{0,002} (pH du sol), (ii) réduit sensiblement le point de charge zéro, pH₀ (PC), (iii) augmente substantiellement la charge négative CEC_T et CEC_b, collectrices des cations avec réduction concomitante de la charge positive CEA, fixatrice des anions. De plus, l'étude décèle une forte corrélation exponentielle à la probabilité $p < 0,01$ ($R^2 = 0,94$; $y = 0,97 e^{-0,63x}$) entre la charge négative CEC_T et la différence (pH₀ – pH_{sol}), indiquant que le modèle de Gouy-Chapman constitue vraisemblablement une option alternative de gestion durable des sols de l'hinterland de Kinshasa. La DRK et la PC sont ainsi dotées des potentialités requises pour améliorer sensiblement les propriétés de charge électrique des sols fortement altérés de Batéké.

Mots clés

Arénosols, point de charge zéro (pH₀), charge électrique, fertilité chimique et charge variable.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment toute leur gratitude au staff technique du laboratoire du Département de Géologie de

l'Université de Gand (Belgique) pour toutes les facilités accordées à la réalisation de certaines analyses spécialisées de cette étude.

REFERENCES

- ALLMAN M., LAWRENCE D.F. [1972]. Geological laboratory techniques. ARCO Publishing Co., Inc, New York.
- ANDA M. [2006]. Improvement of charge characteristics of Oxisols using basalt and composted rice husk for cocoa growth. Ph.D. Thèse de doctorat, Université de Putra, Malaysia.
- ANDA M., SHAMSHUDDIN J., FAUZIAH C.I., SYED OMAR S.R. [2009]. Dissolution of ground basalt and its effect on Oxisol chemical properties and cocoa growth. *Soil Sci.*, 174, 264-271.
- ANO A.O., UBOCHI C.I. [2007]. Neutralization of soil acidity by animal manures: mechanism of reaction. *African J. of Biotechnol.*, 6,4, 364-368.
- BAERT G. [1995]. Properties and chemical management aspects of soils on different parent rocks in the Lower Congo. Ph.D. Thesis, Ghent University, Belgium.
- BONIAO R.D., SHAMSHUDDIN J., VAN RANST E., ZANYAH S., SYED OMAR R. [2002]. Changes in chemical properties and growth of corn in volcanic soils treated with peat, ground basalt pyroclastics, and calcium silicate. *Commun. Soil Plant Anal.*, 33, 1219-1233.
- DE CONINCK F., STOOPS G., VAN RANST E. [1986]. Mineralogy and micromorphology of a soil toposequence near Matadi (Lower Zaïre) on chloritic green rocks. In: *Geochemistry and mineral formation in the earth surface (Proc. of the Int. Meeting "Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation")*. Ed. : R. Rodriguez-Clemente and Y. Tardy, Centre National de la Recherche Scientifique, Granada, Spain, 157-174.
- DUCHAUFOUR P. [2004]. Introduction à la Science du Sol : Sol, Végétation et Environnement, 6e Edition, Dunod.
- ERICH M.S., OHNO T. [1992]. Titrimetric determination of calcium carbonate equivalent of wood ash. *Analyst* 117, 993-995.
- FAO-UNESCO [1990]. Soil map of the World, Revised Legend. World Soil Resources Reports No. 60, FAO, Rome.
- GILLMAN G. [1981]. Effects of pH and ionic strength on the cation exchange capacity of soils with variable charges. *Aust. J. Soil Res.*, 19, 93-96.
- GILLMAN G. [1985]. Influence of organic matter and phosphate content on the point of zero charge of variable charge components in Oxidic Soils. *Aust. J. Soil Res.*, 23, 643-646.
- GILLMAN G. [2007]. Analytical tools for understanding the properties and behaviour of variable charge soils. *Aust. J. Soil Res.*, 45, 83-90.
- GILLMAN G., BURKETT D.C., COVENTRY R.J. [2002]. Amending highly weathered soils with finely ground basalt rock. *Appl. Geochem.* 17, 987-1001.
- GILLMAN G., BURKETT D.C., COVENTRY R.J. [2001]. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. *Aust. J. Soil Res.* 39, 799-811.
- GILLMAN G., SUMPTER E. [1986]. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 24, 61-66.
- GLASER B., LEHMAN J., ZECH W. [2002]. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35, 219–230.
- HAYNES R.J., MOKOLOBATE M.S. [2001]. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by addition of organic residues: a critical review of the phenomenon and mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 59, 47–63.

- HUE N.V., AMIEN L. [1989]. Aluminum detoxification with green manures. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 20, 1499-1511.
- IYAMUREMYE F., DICK R.P. [1996]. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. *Adv. Agron.*, 56, 139-185.
- JOSLYN M.A. [1970]. A sery of monography. *Food Sci. Tech.* Second edition Board.
- KAMPRATH E.J. [1970]. Exchangeable Al as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 252-4.
- KANYANKOGOTE P., VAN RANST E., VERDOODT A., BAERT G. [2005]. Effet de la lave trachybasaltique broyée sur les propriétés chimiques de sols de climat tropical humide. *Etude et Gestion des Sols*, 12, 301-311.
- KASONGO R. K., VAN RANST E., VERDOODT A., KANYANKOGOTE P., BAERT G. [2010]. Roche phosphatée de Kanzi comme engrais à propriété amendante pour des sols sableux de l'Hinterland de Kinshasa (RD Congo). *Etude et Gestion des Sols*, 17, 1, 47-68.
- KASONGO R.K., VAN RANST E., VERDOODT A., KANYANKOGOTE P., BAERT G. [2009]. Impact of *Acacia auriculiformis* on the chemical fertility of sandy soils on the Batéké plateau (D. R.Congo). *Soil Use Manage.*, 25, 21-27.
- KASONGO R.K., VERDOODT A., KANYANKOGOTE P., BAERT G., DUMON M., VAN RANST E. [2012]. Effet in vitro de la roche verte de Gangila sur les propriétés physico-chimiques des sols de l'hinterland de Kinshasa. *Can. J. Soil Sci.*, 92, 787-797.
- KASONGO R.K., VERDOODT A., KANYANKOGOTE P., BAERT G., VAN RANST E. [2011]. Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for sandy soils in humid tropical environments. *Soil Use Manage.*, 27, 94 -102.
- KUMAR K.S., SANJIB K. [2020]. Electro-chemical charge characteristics of surface-subsurface region of selected soils in the tropics. *Eurasian J Soil Sci.*, 9, 1, 60 – 65.
- LANDON J.R. [1991]. *Booker Tropical Soil Manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics.* Paperback edition. Longman. Booker Tate limited, Oxon, England.
- MARCELINO V. [1995]. Characteristics and genesis of sandy soils of Lower Congo, Ph.D. Thesis in Earth Sciences, Ghent University, Belgium.
- MATERECHERA S.A., MKHABELA T.S. [2002]. The effectiveness of lime, chicken manure and leaf Litter ash in ameliorating acidity in a soil previously under black wattle (*Acacia mearnsii*) plantation. *Biores. Technology*, 85, 9-16.
- MOGHIMI A.H., HAMDAN J., SHAMSHUDDIN J., SAMSURI A.W., ABTABI A. [2013]. Physicochemical Properties and Surface Charge Characteristics of Arid Soils in Southeastern Iran. *Applied and Envi. Soil Sci*, Article ID 252861, 11 pages.
- NOBLE A., MOODY P., LIU G., RUAYSOONGNEM S., BERTHELSEN S. [2003]. Quantification of soil chemical degradation and its remediation in tropical Australia. *China and Thailand. Pedosphere*, 13, 31-39.
- OORTS K., VANLAUWE B., COFIE O.O., SANGINGA N., MERCKX R. [2020]. Charge characteristics of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol under some multipurpose trees. *Agroforestry Syst.*, 48, 169–188.
- OSSOM E.M., RHYKERD R.L. [2008]. Effect of Lime on Soil and Tuber Chemical Properties and Yield of Sweetpotato (*pomoea batatas* L. Lam.) in Swaziland *Am.-Eurasian J. of Agro.*, 1,1, 1-5.
- OYA K., KHONDER M. [1996]. Effect of Liming on the Yield and Nutrient Uptake of Common Millet Grown on a Yellow Acid Soil of Okinawa. *Sci. Bull. Coll. Agri., Univ. Ryukyus*, 43, 81-88.
- QAFOKU P., VAN RANST E., NOBLE A., BAERT G. [2004]. Variable charge soils: their mineralogy, chemistry and management. *Adv. Agron.*, 84, 159–215.
- SHAMSHUDDIN J. [2001]. The charge properties of highly weathered tropical soils. Geological Society of Malaysia, Annual Geological Conference, June 2-3 2001.
- SOIL SURVEY STAFF [1992]. *Keys to Soil Taxonomy*, SMSS Technical Monograph No. 19, 5th Printing, Pocahontas Press, Inc., Blacksburg, Virginia.
- SOIL SURVEY STAFF. [2010]. *Keys to soil taxonomy*. 11th ed. Natural Resources Conservation Service, USDA. Washington, DC.
- SYS C. [1983]. The Ferralsols of Zaire. Proceeding of the fourth International soil Classification workshop. Agricultural Edition 4, Part I, 76-110.
- SYS C., VAN WAMBEKE A., FRANKART J. [1961]. La cartographie des sols au Congo. Ses principes et ses méthodes. *Publi. I.N.E.A.C., Série Scient. No. 66.*
- UEHARA G., GILLMAN G. [1980]. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals. I. Theory. *Soil Sci. Am. J.*, 44, 250-252.
- UEHARA G., GILLMAN G. [1981]. The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. *Westview Trop. Agric. Series No 4.*
- VAN RANST E. [1994]. Rational soil management in the humid tropics. *Bull. Séanc. Acad. R. Sci.*, 40, 2, 209-233.
- VAN RANST E., SHAMSHUDDIN J., BAERT G., DZWOWA P.K. [1998]. Charge characteristics in relation to free iron and organic matter of soils from Bambouto Mountains, Western Cameroon. *Euro. J. Soil Sci.*, 49, 243-252.
- VAN RANST E., VERLOO M., DEMEYER A., PAUWELS J.M. [1999]. *Manual for the soil chemistry and fertility laboratory. Analytical methods for soils and plants equipment and management of consumables.* Ghent University, Ghent, Belgium (ISBN 90-76603-01-4).
- VAN SOEST P.J., Robertson J.B., Lewis B.A. [1991]. Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polyaccharids in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.*, 78, 3583-3597.
- VAN STRAATEN P. [2007]. *Agrogeology: The use of rocks for crops.* Enviroquest Limited, Cambridge, ON.
- VANDENBYGAART A.J. [2011]. Regosolic soils of Canada: Genesis, distribution and classification. *Can. J. Soil Sci.*, 91, 881-887.
- WRB [2006]. *World reference base for soil resources 2006*, 2nd edn. World Soil Resources Report No. 103. FAO, Rome.
- XU R.K., QAFOKU N.P., VAN RANST E., LI J.Y., JIANG J. [2016]. Adsorption properties of subtropical and tropical variable charge soils: Implications from climate change and biochar amendment. *Adv. Agron.*, 135: 1-58.
- YAN F., SCHUBERT S., MENGEL K. [1996]. Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic acids. *Soil Biol.*, 28, 617-623.



This work is in open access,

licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>