

Roche phosphatée de Kanzi comme engrais à propriété amendante pour des sols sableux de l'Hinterland de Kinshasa (RD Congo)

R. Koy Kasongo^{(1),(2)}, E. Van Ranst⁽²⁾, A. Verdoodt⁽²⁾, P. Kanyankogote⁽¹⁾ et G. Baert⁽³⁾

- 1) Département des Sciences de la Terre, Laboratoire de Pédologie, Université de Kinshasa, BP 190 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo
- 2) Département de Géologie et de Pédologie (WE13), Laboratoire des Sciences du Sol, Université de Gand, Krijgslaan 281 (S8), B-9000 Gent, Belgique, Eric.VanRanst@UGent.be
- 3) Département de production des plantes, Collège Universitaire de Gand, Voskenslaan 270, B-9000 Gent, Belgique.

RÉSUMÉ

Les effets d'applications de roches phosphatées extraites à Kanzi (RD Congo) sur diverses propriétés physico-chimiques de sols sableux sous climat tropical humide ont été étudiés *in vitro*. Des quantités de 199, 397 et 794 mg roche (kg terre)⁻¹ correspondant sensiblement à 0,62, 1,24 et 2,48 t.ha⁻¹ de roche finement broyée ont été mélangées avec des terres de surface (0-25 cm), puis incubées et lessivées pendant 3, 6, 9, 12, 18 et 24 mois. Les sols amendés sont des Arénosols de l'hinterland de Kinshasa caractérisés par une faible fertilité chimique, un pouvoir de rétention en eau très limité, et présentent une réaction acide allant jusqu'à une toxicité aluminique et manganique pour les cultures. L'apport de la roche phosphatée de Kanzi au sol augmente significativement ($p < 0,05$) le pH (> 5,5), la disponibilité en phosphore, la somme des cations Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ et Na⁺ et la CEC, et accroît d'environ 5 % la rétention d'eau dans les sols. De plus, le relèvement du pH et la réduction du pH₀ due à l'adsorption spécifique d'ions phosphate ont engendré une augmentation significative des charges négatives CEC_B et CEC_T avec une neutralisation complète de la phytotoxicité aluminique. L'analyse du percolat a permis de démontrer qu'un apport de phosphate de Kanzi, dans l'objectif d'une agriculture durable, influence positivement la dynamique des cations et immobilise certains microéléments tels que Fe, Cu, Mn et Zn. La perte relative des cations monovalents (K⁺, Na⁺) était nettement plus importante que celle des ions bivalents (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺).

Mots clés

Sol sableux, phosphate de Kanzi, hinterland de Kinshasa, sable de Kalahari, fertilité chimique du sol.

SUMMARY**KANZI ROCK PHOSPHATE AS FERTILIZER AND AMENDMENT FOR THE SANDY SOILS OF KINSHASA'S HINTERLAND (DR CONGO)**

In this study, the effects of Kanzi rock phosphate application on various physico-chemical properties of sandy soils under humid tropical climate were studied *in vitro*. Different amounts of 199, 397 and 794 mg rock (kg soil)⁻¹ corresponding to 0.62, 1.24 and 2.48 t.ha⁻¹, of finely ground phosphate rock were mixed with topsoil (0-25 cm), and incubated and leached for 3, 6, 9, 12, 18 and 24 months, respectively. The amended soils are Arenosols from Kinshasa's hinterland characterized by a low chemical fertility, a very limited water retention capacity, and an acid reaction with Al and Mn toxicities. The use of Kanzi rock phosphate resulted in a significant increase ($p < 0,05$) of pH (> 5,5), available phosphorus, sum of cations and CEC, and increased significantly the water retention by about 5 %. Furthermore, the increased soil pH and the decrease in pH_0 due to the specific phosphate sorption, brought about a significant increase of negative charges, CEC_B and CEC_T, with complete neutralization of phytotoxic exchangeable Al. Leaching experiments showed that the application of phosphate rock, aimed to promote sustainable agriculture, affected significantly the dynamic of cations and immobilized micro-nutrients (Fe, Cu, Zn, Mn). The relative loss of monovalent cations (K⁺, Na⁺) was significantly higher than that of bivalent ones (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺).

Key-words

Sandy soil, Kanzi rock phosphate, Kinshasa's hinterland, Kalahari sand, soil fertility.

RESUMEN**ROCAS FOSFATADAS DE KANZI COMO FERTILIZANTE CON PROPIEDAD QUE ENMIENDA PARA LOS SUELOS ARENOSOS DEL HINTERLAND DE KINSHASA (RD CONGO)**

Se estudiaron *in vitro* los efectos de aplicación de rocas fosfatadas extraídas en Kanzi (RD Congo) sobre diversas propiedades físico-químicas de suelos arenosos bajo clima tropical húmedo. Se mezclaron cantidades de 199, 397 y 794 mg de roca (kg tierra)⁻¹ que corresponde próximamente a 0,62, 1,24 y 2,48 t.ha⁻¹ de rocas finamente molidas con tierras de superficie (0 – 25 cm), y incubadas y lavadas durante 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses. Los suelos enmendados son Arenosoles del Hinterland de Kinshasa caracterizados por una pequeña fertilidad química, un poder de retención en agua muy limitado, y presentan una reacción ácida que induce una toxicidad aluminica y manganesa a los cultivos. El aporte de la roca fosfatada de Kanzi al suelo aumenta significativamente ($p < 0,05$) el pH (> 5,5), la disponibilidad en fósforo, la suma de los cationes Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ et Na⁺ y la CIC, y aumenta aproximadamente de 5 % la retención en agua en los suelos. Además, el aumento del pH y la reducción del pH_0 debida a la adsorción específica de iones fosfatos generaron un aumento de las cargas negativas CEC_B et CEC_T con una neutralización completa de la fitotoxicidad aluminica. El análisis del percolado permitió demostrar que un aporte de fosfato de Kanzi con el objetivo de una agricultura sostenida, influencia positivamente la dinámica de los cationes y inmoviliza ciertos microelementos como Fe, Cu, Mn y Zn. La pérdida relativa de los cationes monovalentes (K⁺, Na⁺) estuvo netamente más importante que la de los iones bivalentes (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺).

Palabras clave

Suelo arenoso, fosfato de Kanzi, Hinterland de Kinshasa, arena de Kalahari, fertilidad química del suelo.

En Afrique tropicale, la définition, pour leur mise en œuvre, de systèmes d'agricultures durables et productives, parce qu'ils constituent un atout majeur pour le développement, est une des priorités pour assurer le bien-être et la sécurité alimentaire de la population. L'augmentation de la population et la dégradation continue des sols sous climats tropicaux nécessitent de concevoir des systèmes appropriés de gestion à long terme (Sanchez, 2002) afin d'assurer et de garantir la sécurité alimentaire, assurant comme l'a envisagé Hervieu « le droit de peuples à se nourrir eux-mêmes ».

Les populations rurales d'Afrique tropicale vivent de l'agriculture et les sols constituent la base de leur survie. La majorité des sols sous climats tropicaux possèdent des facteurs limitants majeurs pour la croissance des cultures, en raison du système traditionnel de culture itinérante pratiqué, du déséquilibre de la balance exportation-restitution des nutriments et des conditions climatiques de la région, lesquelles accélèrent la dégradation de la fertilité chimique des sols (Van Straaten, 2007). Selon Sanchez (2002), les sols de l'Afrique subsaharienne voient décroître en moyenne annuellement, et par hectare, leur stock d'azote de 22 kg, celui de phosphore (P) de 2,5 kg et celui de K de 15 kg potassium (K). La déficience en ces nutriments est ainsi devenue permanente dans beaucoup des systèmes de production agricole en région tropicale. Cette situation est particulièrement critique pour les sols sableux tropicaux, hérités des sables de recouvrement du type Kalahari, d'origine fluviatile et/ou fluvio-lacustre. En effet, la faible fertilité chimique et le faible pouvoir de rétention en eau, en plus de l'acidité sont les contraintes principales à la production agricole des sols sableux (Bruand *et al.*, 2005).

L'application d'engrais chimiques hydrosolubles est une pratique efficace pour restituer aux sols les éléments nutritifs perdus de longue date. Mais ces engrais, dont la production nécessite des quantités d'énergie importante, sont alors assez coûteux et ne sont pas accessibles à la majorité des fermiers africains disposant de faibles capitaux et autres ressources agricoles.

L'utilisation des ressources géologiques locales, communément appelées agro-minéraux ou roches fertilisantes (péto-fertilisants), est une alternative de gestion intégrée et adaptée de la fertilité des sols, susceptible d'améliorer leur productivité en intensifiant la production agricole en région tropicale. Les agro-minéraux sont des matériaux géologiques naturels, traités ou non traités, pouvant être utilisés dans les systèmes de production agricole pour améliorer la productivité du sol (Van Straaten, 2007). Ils correspondent à l'ensemble des matériaux géologiques contenant un ou plusieurs éléments nutritifs indispensables pour la nutrition des plantes (Appleton, 1990; Leonardos *et al.*, 2000). Parmi les roches fertilisantes utilisées en agriculture tropicale, les phosphates naturels (PN) doivent, sous conditions physico-chimiques avérées, constituer un produit fertilisant et amendement important et précieux des

sols sableux tropicaux. Ils peuvent dans un certain nombre de conditions apporter, du phosphore (P), des nutriments secondaires (Ca, Mg), et éventuellement certains oligo-éléments (Zn, Mo) (Sinclair *et al.*, 1990; Hu *et al.*, 1997; Van Straaten, 2007). De plus, l'effet chaulant associé à l'utilisation des PN, surtout ceux contenant des carbonates libres (Sikora, 2002), peut accroître significativement le pH du sol et *ipso facto* la fertilité des sols tropicaux (Chien, 1997; Hu *et al.*, 1997; Chien et Friesen, 2000; Sikora, 2002), du seul fait de la réduction de la toxicité aluminique et de la capacité des ions aluminium à se lier aux ions phosphates.

Il a été établi que l'efficacité agronomique d'un PN dépend pour partie, pour l'élément phosphore, de sa réactivité chimique (FAO, 2004; Van Straaten, 2007), laquelle est déterminée conventionnellement par la mesure de la solubilité du PN dans des solutions d'extraction acides telles : acide citrique-AC %, et acide formique-AF à 2 %, ou neutres, mais chélatant du calcium tel citrate d'ammonium neutre - CAN (Chien et Hammond, 1978). Ainsi, utilisant des caractéristiques minéralogiques, chimiques et texturales des roches phosphatées naturelles, plusieurs auteurs ont déterminé leur adéquation à leur usage pour une application directe (Hu *et al.*, 1997; FAO, 2001; Maene, 2003; Van Straaten, 2007).

L'objectif de cette étude a consisté à déterminer les effets d'apports du phosphate de Kanzi finement broyé sur la qualité physico-chimique des sols sableux de l'arrière-pays de Kinshasa (RD Congo), en mettant l'accent, après apport de ce PN à une terre, sur les modifications de : (i) la fertilité P ; (ii) la capacité de la terre à retenir des éléments nutritifs et modifier ainsi l'importance du lessivage des cations ; (iii) la capacité de rétention en eau des terres.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Roche phosphatée de Kanzi

La roche phosphatée utilisée provient du gisement de phosphates naturels de Kanzi, situé à 45 km à l'ouest de Boma, le long de la route Boma-Moanda (Bas-Congo) à 70 km du littoral Atlantique. Les derniers travaux de forage réalisés sur ces phosphates (Mupepele *et al.*, 2004) montrent que les formations de Kanzi (9000 x 723 m, soit 6,5 km² d'extension totale, et capable d'augmenter suite au nouvel affleurement observé à Baka, 8 km NNS, de Kanzi et 2 km SE de Kudi-Boma), représentent un tonnage de 25 Mt. L'échantillonnage a été pratiqué près de l'École Primaire Catholique de Kanzi à une profondeur d'environ 5 m. Les échantillons prélevés ont été pulvérisés dans un mortier en agate, puis tamisés à l'aide d'un système de tamisage Ultrasons. La fraction fine (< 100 µm) obtenue a été utilisée comme amendement des sols. L'étude minéralogique de la poudre de cette roche par diffraction X

montre qu'elle est constituée, pour sa fraction cristallisée, principalement de fluoroapatite et de wavellite comme sources potentielles de phosphore. On y trouve également du quartz, des feldspaths et des faibles teneurs de carbonates libres et de phyllosilicates 2:1 (mica, smectite) (Koy Kasongo, 2009). Le fait de trouver de la Wavellite signe une transformation *in situ* des phosphates initiaux de calcium comme ce fût le cas au Sénégal et dans l'île de Nauru pour les phosphates aluminocalciques.

La composition chimique moyenne des échantillons de la roche déterminée sur la poudre fine (Koy Kasongo, 2009), indique que la roche utilisée contient (%): 37,80 SiO₂; 9,22 Al₂O₃; 4,69 Fe₂O₃; 13,44 CaO; 0,13 MgO; 0,52 K₂O; 0,29 Na₂O; 0,01 MnO; 0,12 TiO₂; 21,99 P₂O₅; 1,2 F; 3,71 H₂O (eau libre); 6,49 H₂O⁺ (perte au feu); et 1,82; 1,26 et 51 mg.kg⁻¹ Cd, Pb et Cr, respectivement.

Par ailleurs, la roche contient un équivalent en CaCO₃ de 8,5 % et possède un pH-H₂O de l'ordre de 5,70. Le contenu de silice, fer et aluminium rend cette roche phosphatée totalement impropre à toute transformation chimique utilisant des acides forts et ayant pour objet de transformer les phosphates calciques (ou ferriques et aluminiques) en phosphate, type superphosphate, hydrosoluble. C'est donc *a priori* dans le cadre d'une utilisation directe que cette roche peut être employée en agriculture. La solubilité du P₂O₅, par rapport au P₂O₅ total, dans les réactifs conventionnels (Chien et Hammond, 1978) est de 4,35 % dans le CAN, de 8,25 % dans AC à 2 % et 10,10 % dans AF à 2 %. Cette roche possède ainsi un potentiel agronomique moyen (Diamond, 1979) et une réactivité moyen-élevée (Van Straaten, 2007). La dose d'application de la roche a été calculée sur base d'une quantité cible de 25 kg P₂O₅ ha⁻¹ en moyenne soluble dans le couple acide citrique – acide formique. Pour ce faire on tient compte de la solubilité moyenne en milieu acide citrique-formique (9,2 % P₂O₅) et de la teneur totale de la roche en P₂O₅ (21,99 %).

La dose ainsi calculée est de 1,24 (t PN).ha⁻¹ soit 273 kg P₂O₅ ha⁻¹, correspondant à 159 mg de PN par 400 g de terre, soit 35 mg de P₂O₅ par 400 g de terre ou 15 mg de P par 400 g de terre. Pour l'expérimentation *in vitro* proposée, trois doses d'application de la roche ont été utilisées, à savoir: la dose calculée (159 mg de PN par 400 g de terre), le double de la dose calculée (318 mg de PN par 400 g de terre) et la moitié de cette dose calculée (80 mg de PN par 400 g de terre).

Sols

L'environnement physiographique de l'hinterland de Kinshasa ainsi que certaines propriétés importantes des sols ont été décrits dans Kasongo *et al.* (2009). Brièvement, les sols de l'hinterland de Kinshasa sont classifiés comme *Rubique Ferralique Arénosol (Dystrique)* selon le système de classification WRB (IUSS Working Group WRB, 2006), et comme *Quartzipsamment Ustoxique Isohyperthermique* suivant la classification américaine

(Soil Survey Staff, 2006). Les sols de la couche arable ont une composition granulométrique moyenne de l'ordre de 3,4 % argile, 5,6 % limon et 91,0 % sable, et possèdent une densité apparente d'environ 1,25. La pluviométrie annuelle de l'hinterland de Kinshasa est de l'ordre de 1300 mm, avec une distribution bimodale inégalement répartie le long de l'année.

Les sols utilisés dans cette étude proviennent de deux sites sous savane naturelle (16°18'02"E, 04°20'01"S, ± 580 m ASL: site 1, et 16° 09' 20"E, 04°32'16"S, ± 658 m ASL: site 2), situés au nord-est de Kinshasa à 150 km, le long de la route Kinshasa-Kikwit. Cinquante échantillons (25/site) de surface (0-25 cm) prélevés de manière aléatoire dans une superficie d'environ 25 ha ont été soigneusement mélangés puis un échantillon composite a été obtenu par la méthode de quartage. Ce mélange d'échantillons de deux sites permettrait de tirer l'acidité du premier site (pH-H₂O 5,20) vers celle du deuxième (pH-H₂O 5,07).

Dispositif expérimental et incubation des sols

Les traitements expérimentaux ont consisté en l'application de phosphate de Kanzi à 3 doses correspondant à 19, 38 et 76 mg P (kg terre)⁻¹, soit 0,62, 1,24 et 2,48 t.ha⁻¹. 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 chaque traitement, 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 - 33 kPa) avec de l'eau distillée et incubés pendant 24 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 de l'hinterland de Kinshasa) a été ajoutée pendant le premier trimestre, à raison de 46,7 ml chaque semaine.

À l'issue de ces trois premiers mois, l'expérimentation a été arrêtée, les terres ont été séchées à l'air, soigneusement homogénéisées. Un échantillon d'environ 50 g a été prélevé dans chaque colonne pour la détermination du pH, du carbone organique, de l'azote total, du phosphore disponible, de la CEC et des cations échangeables, et des propriétés de charge. Les lixiviats obtenus dans des flacons en plastique ont été retirés régulièrement après chaque percolation et conservés au

réfrigérateur, et ont servi pour: (i) effectuer les calculs de bilan hydrique, (ii) déterminer le pH, (iii) doser les cations nutritifs (Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Cu et Zn).

Puis, pour poursuivre l'expérimentation, la terre a été pesée de nouveau, remise 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 la terre ait été humectée à la capacité au champ. Cette opération a été répétée pendant 24 mois.

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

Méthodes analytiques

Les analyses des sols ont été réalisées, suivant les procédures standard, sur la terre fine 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), la terre est de nouveau saturée de Ca et portée 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: CEC_B (Ca_{ads}), CEC_T (Ca+Al)_{ads}, et CEA.

Les échantillons des percolats ont été analysés pour le volume collecté, le pH directement déterminé après la dernière collecte avec une électrode de verre connectée à un pH-mètre de marque CONSORT (P902) et les cations nutritifs (Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Zn et Cu) dosés par absorption atomique dans les extraits acidifiés avec l'acide nitrique concentré.

Analyse statistique

L'analyse de la variance (ANOVA), effectuée avec le logiciel SPSS 16, a été utilisée pour déterminer l'impact de phosphate de Kanzi sur les propriétés des sols. 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 $p < 0,05$.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Effets de la roche phosphatée de Kanzi sur les propriétés physico-chimiques des terres

Les propriétés chimiques des sols après 9 mois d'incubation sont présentées dans le *tableau 1*, alors que la *figure 1* illustre l'évolution en fonction du temps d'incubation, du pH, de P extrait par Bray 2, de la somme des cations et de la CEC des sols amendés de phosphate de Kanzi.

Acidité et Al échangeable

En général, l'analyse de variance a mis en évidence une différence significative ($p < 0,05$) entre les traitements: le phosphate de Kanzi a significativement augmenté le pH des terres, quelle que soit la dose, puisqu'un pH-H₂O nettement supérieur à 5,5 a été enregistré dans tous les traitements avec le phosphate de Kanzi durant les 24 mois d'expérimentation. L'augmentation significative du pH induite par l'application de phosphate de Kanzi a produit une réduction significative ($p < 0,05$) de la teneur de l'aluminium échangeable durant toute la durée de l'incubation des terres. Les résultats illustrent que l'application de 0,62, 1,24 et 2,48 t.ha⁻¹ de roches phosphatées de Kanzi aux Arénosols de l'hinterland de Kinshasa, relève le pH-H₂O de 5,26 (témoin) à 6,06, 6,16 et 6,27 après 9 mois d'incubation (*tableau 1*) et de 5,20 (témoin) à 5,75, 5,82 et 5,92 après 24 mois d'incubation. Calculée sur toute la période

Tableau 1 - Propriétés chimiques des sols après 9 mois d'incubation des sols avec la roche phosphatée de Kanzi ($P_1 = 0,62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1,24 \text{ t.ha}^{-1}$ et $P_3 = 2,48 \text{ t.ha}^{-1}$)

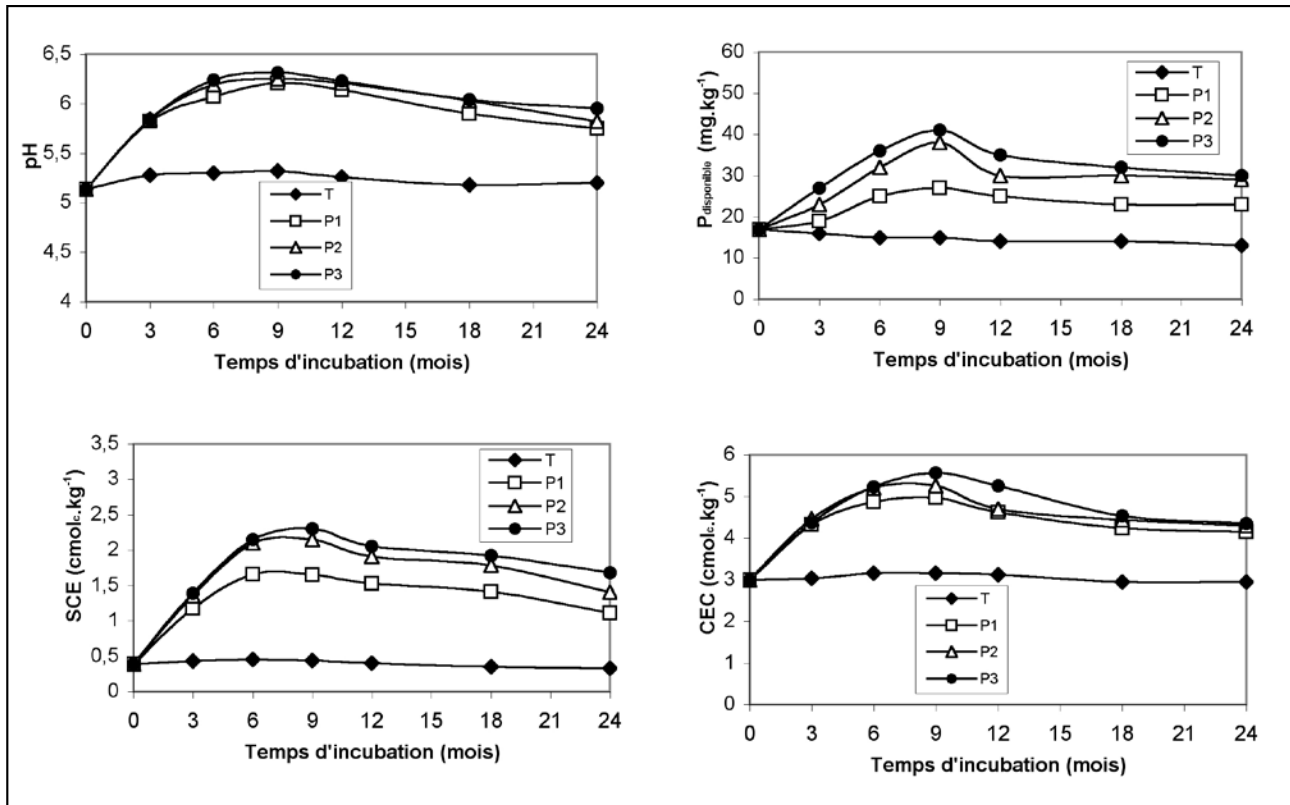
Table 1 - Chemical soil properties after 9 months incubation with Kanzi rock phosphate ($P_1 = 0.62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1.24 \text{ t.ha}^{-1}$ and $P_3 = 2.48 \text{ t.ha}^{-1}$)

Trait.	pH		CO	N	P (mg. kg ⁻¹)	Ca	Mg	K	Na	SCB	CEC	Aléch
	H2O	KCl	(%)			(cmolc.kg ⁻¹)						
T	5,26a	4,11a	0,99	0,056a	15a	0,27a	0,15a	0,03a	0,02a	0,47a	2,98a	1,35b
P ₁	6,06b	5,06b	1,06	0,072b	27b	1,33b	0,23b	0,05b	0,02a	1,63b	4,97b	0,00a
P ₂	6,16c	5,10b	1,08	0,073b	34c	1,74c	0,26b	0,06b	0,03b	2,06c	5,28c	0,00a
P ₃	6,27d	5,14b	1,04	0,073b	40d	1,91d	0,26b	0,06b	0,03b	2,26d	5,57d	0,00a
CV (%)	7,21	9,3	7,9 (ns)	13,2	78,0	49,2	28,6	33,4	33,2	46,6	22,4	> 100

Les moyennes suivies des lettres différentes au sein d'une colonne sont statistiquement différentes au test LSD ($p < 0,05$), CV = coefficient de variation, ns = non significatif à la probabilité $p < 0,05$, T = témoin.

Figure 1 - Evolution du pH, du phosphore disponible, de la somme des cations échangeables (SCE) et de la CEC en fonction du temps (0-24 mois) et de la dose de phosphate de Kanzi ($P_1 = 0,62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1,24 \text{ t.ha}^{-1}$ et $P_3 = 2,48 \text{ t.ha}^{-1}$).

Figure 1 - Evolution of pH, available phosphorus, sum of cations and CEC with time (0-24 months) and application rate of Kanzi rock phosphate ($P_1 = 0.62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1.24 \text{ t.ha}^{-1}$ and $P_3 = 2.48 \text{ t.ha}^{-1}$).



d'incubation, l'augmentation moyenne de pH a été de 0,72, 0,80 et 0,84 unité de pH par application de 0,62, 1,24 et 2,48 t.ha⁻¹ de phosphate de Kanzi. Nos résultats montrant une augmentation du pH avec réduction concomitante de la teneur de Al échangeable, à la suite d'une application de phosphates naturels et sont similaires à ceux observés par Chien *et al.* (1987), Jadin et Truong (1987), Hu *et al.* (1997) et Sikora (2002), dans d'autres situations agropédologiques et avec des roches phosphatées d'autres origines. Cette augmentation du pH a été attribuée à l'effet chaulant lié à la dissolution de la fluoroapatite du PN qu'à la présence des carbonates libres dans les PN (FAO, 2004; Van Straaten, 2007). Les carbonates libres identifiés en faible teneur dans le phosphate de Kanzi auraient contribué à l'accroissement significatif du pH des terres étudiées. La croissance lente du pH du système sol-PN est certainement l'illustration du rôle des carbonates toujours lents à agir.

Carbone organique et azote total

En général, l'analyse de variance n'a pas mis en évidence une différence significative entre les traitements concernant la teneur en carbone organique et en azote total. La faible teneur en azote total enregistrée dans le témoin (*tableau 1*) serait probablement le résultat de la minéralisation de l'azote organique combiné à son retrait de la solution du sol par percolation, bien que cet élément ne soit pas dosé dans le percolat.

Phosphore extrait par la méthode Bray 2

L'évolution, en fonction de la durée d'incubation, de la teneur en phosphore extrait par la méthode Bray 2 dans les sols amendés de phosphate de Kanzi est présentée dans la *figure 1*. Les teneurs de phosphore extrait obtenues au cours du troisième trimestre d'incubation sont consignées dans le *tableau 1*. L'analyse de la variance a mis en évidence une différence significative entre les traitements. L'augmentation de la dose d'application de phosphate de Kanzi a augmenté significativement ($p < 0,05$) la quantité extraite de la terre. La *figure 1* révèle une présence de phosphore extrait par Bray 2 maximale après 9 mois d'incubation où les valeurs atteignent 15 P_{extrait}.kg⁻¹ pour le témoin et 27, 34 et 40 mg P_{extrait}.kg⁻¹ pour les 3 doses d'apport de phosphate de Kanzi, soit des accroissements, par rapport au témoin, de 12, 19 et 25 mg P_{extrait}.kg⁻¹. A l'évidence ces accroissements sont loin d'être proportionnels aux apports estimés pour la dose médiane à 38 mg P (kg terre)⁻¹. La transformation de la roche phosphatée en forme extractible par l'extractant Bray 2 serait donc de 61,2 % pour la dose demie, 50 % pour la dose calculée et 33 % pour la dose double. Certes, les phosphates transformés par la dissolution progressive de l'apatite pendant l'incubation des sols, combiné à l'accroissement du pH induit par son effet chaulant, sont des facteurs qui auraient contribué à l'augmentation de la disponibilité en phosphore dans les sols étudiés. En effet, l'accroissement du pH du sol au-dessus de la valeur 5,5 provoque généralement la précipitation de l'Al

et augmente ainsi les quantités de phosphore mobile dans le sol (Landon, 1991; Van Straaten, 2007). Mais l'augmentation relativement élevée du pH, jusqu'à 0,8 unité de pH, dans les sols amendés en phosphate, laisse entrevoir la possibilité de réduction de la solubilisation de l'apatite dans les sols étudiés, comme en atteste la non linéarité de l'accroissement des quantités de P extrait par le Bray 2 en fonction des doses apportées (FAO, 2004; Van Straaten, 2007).

Cations et CEC des constituants des terres

En ce qui concerne la présence des cations sur le complexe, l'analyse de la variance 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 par la roche phosphatée de Kanzi sont statistiquement identiques ($p < 0,005$) à celles des sols témoins. L'augmentation de la dose d'application de la roche phosphatée de Kanzi a accru significativement la teneur de Ca échangeable dans les sols. L'étude révèle que l'application de 0,62, 1,24 et 2,48 t.ha⁻¹ de roche phosphatée de Kanzi a produit, après 9 mois d'incubation, des augmentations d'environ 393 %, 544 % et 608 % pour Ca, de 53 %, 73 % et 73 % pour Mg, et de 66 %, 67 % et 67 % pour K (*tableau 1*). L'évolution en fonction du temps d'incubation, de la somme des cations échangeables (SCE) des sols (*figure 1*) indique bien que la SCE dans les sols amendés de roche phosphatée de Kanzi est significativement supérieure à celle du sol témoin pour toute la période d'incubation, et quelle que soit la dose considérée. Le maximum de la SCE a été observé, comme dans le cas de phosphore extrait par Bray 2, après 9 mois d'incubation. Puis la SCE décroît légèrement jusqu'à la fin de l'expérience. L'hypothèse privilégiée, conforme aux explications proposées par Brady et Weil (1996), associe cette diminution du pH au lessivage des cations qui aurait conduit à l'acidification de la terre reflétée par la lente diminution du pH observée durant la même période d'incubation (Roweld et Wild, 1985).

La capacité d'échange cationique (CEC) des terres quantifie leur aptitude à stocker les éléments nutritifs sous forme cationique, et présente un intérêt considérable dans l'étude de la fertilité chimique du sol. En effet, l'apport de la roche phosphatée de Kanzi au sol a significativement ($p < 0,05$) augmenté la CEC des terres. L'accroissement de la CEC, qui atteint 87 %, est fonction de la dose d'application de la roche phosphatée de Kanzi, et son évolution temporelle est similaire à celle de la SCE (*figure 1*). L'augmentation de la CEC est apparemment liée à l'augmentation du pH du sol, mais ce point sera discuté davantage à l'occasion de l'analyse des propriétés de charge des constituants des terres.

Effets de la roche phosphatée de Kanzi sur les propriétés de charge électrique

Les propriétés de charge électrique ont été déterminées sur les échantillons composites (reconstitués à partir d'un mélange

d'échantillons: $n = 6$) ayant reçu la dose la plus élevée, $2,48 \text{ t.ha}^{-1}$, de roche phosphatée de Kanzi. Les courbes de charge obtenues après 9 mois d'incubation des terres ainsi que l'évolution en fonction du temps d'incubation du pH_0 , et des composantes de charge (CEC_B , CEC_T et CEA) au pH du sol (solution CaCl_2 $0,002 \text{ M}$), sont présentées dans les Figures 2 et 3.

La figure 2 démontre que: (i) les terres étudiées sont essentiellement à charge variable (charge dépendant du pH); et (ii) que la composante négative de charge CEC_T (ou CEC_B) croît dans les terres amendées de roche phosphatée de Kanzi. En effet, l'augmentation des charges négatives, CEC_B et CEC_T , est en réalité le résultat: (i) de l'augmentation du pH du sol induit par l'effet chaulant associé à l'application de phosphate de Kanzi; et (ii) de la diminution du pH_0 , due à l'adsorption spécifique de phosphate associée à la dissolution de l'apatite. L'adsorption spécifique de phosphate sur la surface des oxydes ou hydroxydes de Fe ou d'Al (Wann et Uehara, 1978; Gillman, 1985; Qafoku *et al.*, 2004) conduit généralement à la décroissance du pH_0 avec production des charges négatives supplémentaires. Concernant l'évolution du pH_0 , et des composantes de charge (CEC_B , CEC_T et CEA au pH du sol) en fonction du temps d'incubation (figure 3), l'étude révèle que l'apport de la roche phosphatée diminue le pH_0 et la charge positive CEA jusqu'à $0,17$ unité de pH et $0,29 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, respectivement, et augmente les charges négatives CEC_B et CEC_T jusqu'à environ $2,65$ et $2,18 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$. Par ailleurs, l'étude montre une égalité des charges négatives CEC_T et CEC_B , due à l'élimination 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.

Ainsi l'analyse des charges électriques montre que l'application de la roche phosphatée de Kanzi aux Arénosols de

l'hinterland de Kinshasa: (i) augmente le pH du sol, (ii) diminue le pH_0 , (iii) et augmente sensiblement les charges négatives CEC_B et CEC_T , collectrice des cations, avec une réduction concomitante de la charge positive CEA, collectrice des anions.

Effets de la roche phosphatée de Kanzi sur les percolats

Les volumes de percolats recueillis, le pH et les teneurs des cations lessivés obtenus au troisième trimestre d'incubation des terres sont présentés dans le tableau 2. Le tableau 3 résume l'évolution du percolat au cours de la première année d'incubation.

Bilan en eau

Le bilan hydrique pour chaque trimestre d'incubation des sols a été établi en considérant la balance entre la quantité totale d'eau distillée ajoutée, qui a varié du fait de la diminution de la quantité de terre présente dans la colonne, et celle recueillie pendant le trimestre. En général, l'analyse de variance a mis en évidence une différence significative entre les traitements. La fraction percolée des sols témoins était significativement ($p < 0,05$) supérieure à celle recueillie des sols amendés de roche phosphatée de Kanzi. L'étude indique que l'application de $0,62$, $1,24$ et $2,48 \text{ t.ha}^{-1}$ de phosphate de Kanzi au sol, suivi d'un approvisionnement annuel en eau distillée de $1839,2 \text{ ml}$, diminue le volume du percolat qui passe de $871,8 \text{ ml}$ pour la terre témoin à $791,5 \text{ ml}$, $780,7 \text{ ml}$ et $779,2 \text{ ml}$ pour les trois traitements, soit une réduction respective de $4,4 \%$, $4,9 \%$ et $5,0 \%$ qui est une conséquence d'une rétention d'eau plus importante par la terre. Ces résultats montrent que l'apport de phosphate de Kanzi

Figure 2 - Courbes de charge de surface après 9 mois d'incubation pour un apport de $2,48 \text{ t.ha}^{-1}$ de phosphate de Kanzi.

Figure 2 - Surface charge curves after 9 months of incubation with a dose of 2.48 t.ha^{-1} of Kanzi rock phosphate.

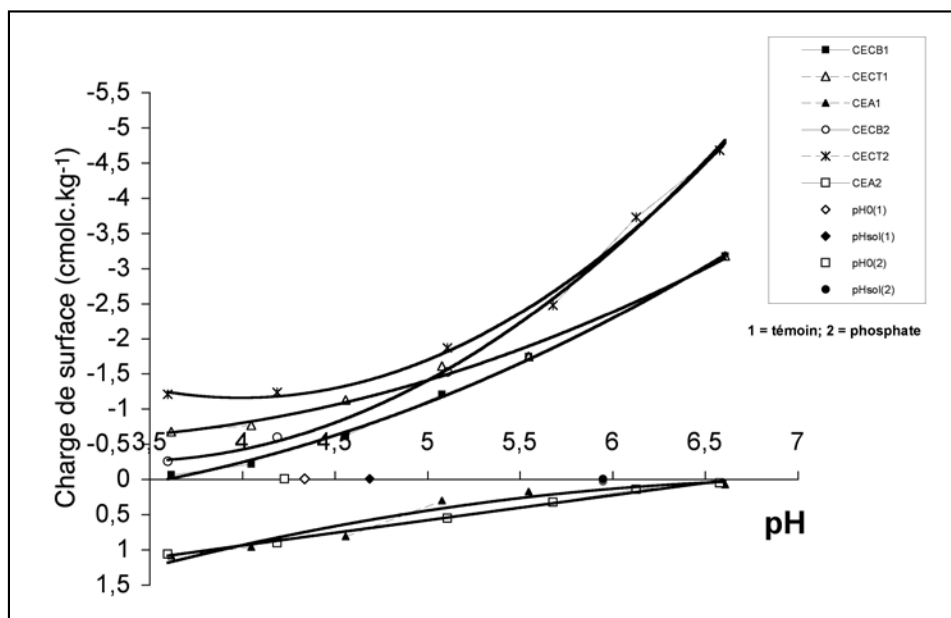


Tableau 2 - Fraction percolée, pH et teneurs en cations lessivés au troisième trimestre d'incubation des sols avec la roche phosphatée de Kanzi ($P_1 = 0,62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1,24 \text{ t.ha}^{-1}$ et $P_3 = 2,48 \text{ t.ha}^{-1}$).

Table 2 - Fraction of leachate collected, pH and leachate cation contents during the third trimester of incubation with Kanzi rock phosphate ($P_1 = 0.62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1.24 \text{ t.ha}^{-1}$ and $P_3 = 2.48 \text{ t.ha}^{-1}$).

Trait.	F (%)	pH	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
			mg l ⁻¹							
T	47,4c	6,19a	11,41a	2,42a	5,60a	2,46a	0,09b	0,43b	0,08b	0,07B
P1	42,5b	7,22b	10,70a	2,99ab	10,64b	3,85b	0,03a	0,02a	0,03a	0,02a
P2	41,1a	7,41b	11,05a	4,04b	11,39b	9,02d	0,03a	0,02a	0,03a	0,01a
P3	41,4a	7,49b	15,41b	2,90ab	19,80c	5,24c	0,03a	0,02a	0,01a	0,01a
CV (%)	6,2	11,9	23,5	35,3	45,9	52,0	69,3	> 100	86,2	96,7

Les moyennes suivies des lettres différentes au sein d'une colonne sont statistiquement différentes au test LSD ($p < 0,05$), CV = coefficient de variation, ns = non significatif à la probabilité $p < 0,05$, T = témoin.

Figure 3 - Evolution du pH_0 et des charges de surface CEA , CEC_B et CEC_T au pH du sol en fonction du temps (0-12 mois) d'incubation pour un apport de $2,48 \text{ t.ha}^{-1}$ de roche phosphatée de Kanzi.

Figure 3 - Evolution of pH_0 and surface charges CEA , CEC_B and CEC_T at the field pH with time (0-12 months) of incubation with a dose of 2.48 t.ha^{-1} of Kanzi rock phosphate.

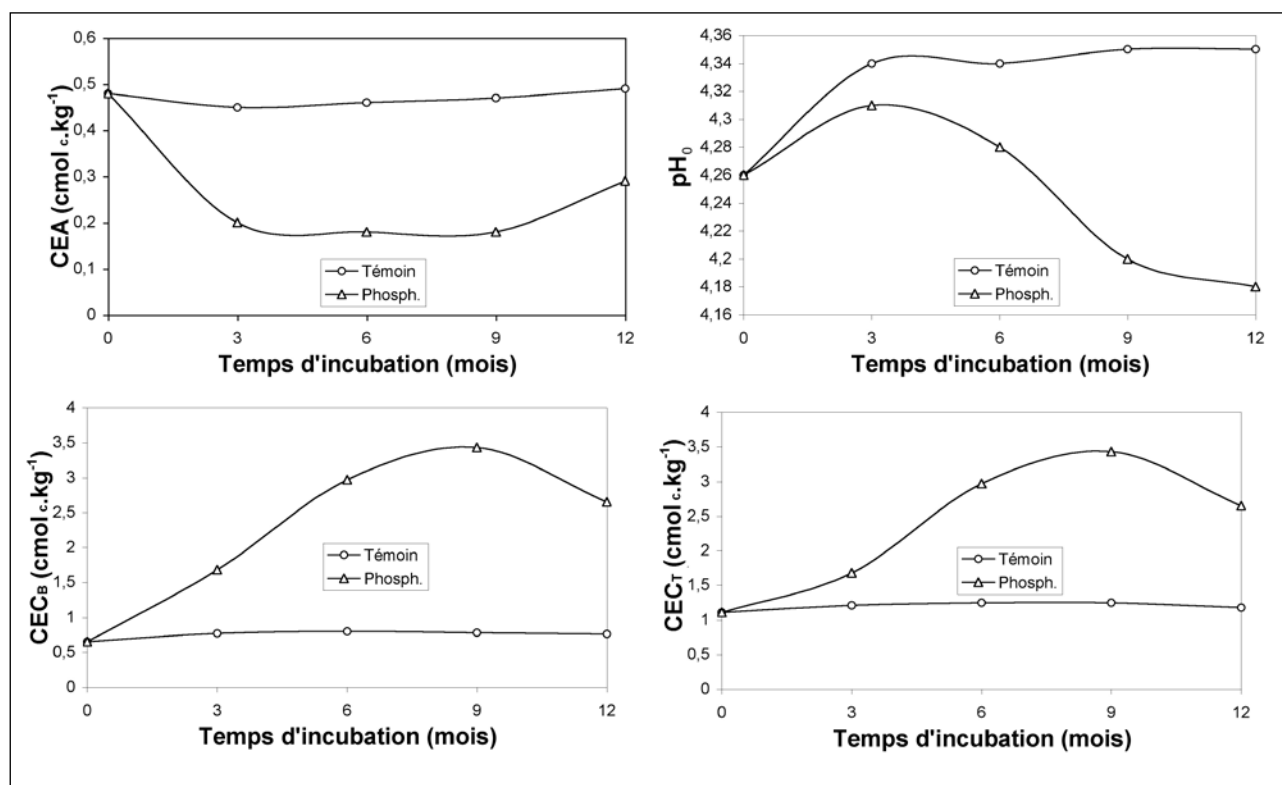
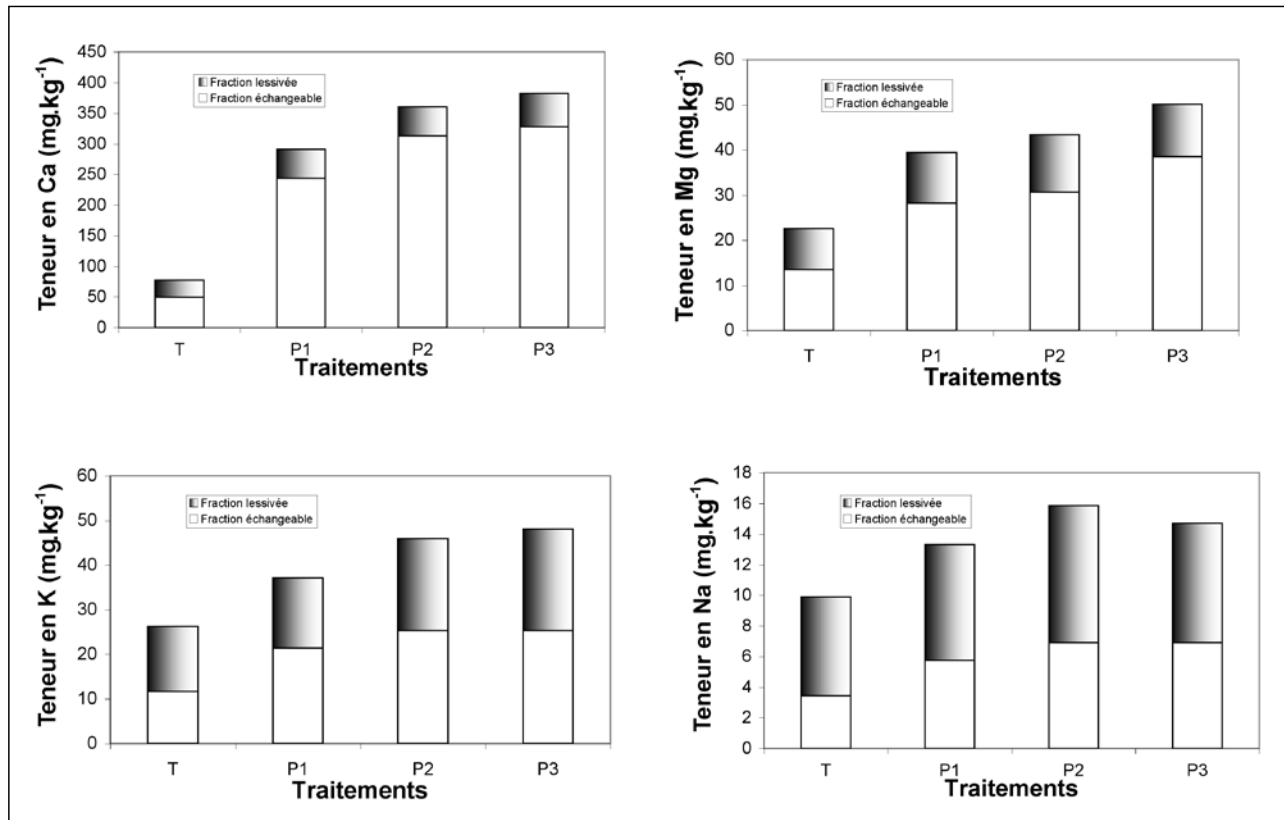


Figure 4 - Distributions des teneurs en Ca, Mg, K et Na entre fractions lessivée et échangeable après 12 mois d'incubation des sols avec la roche phosphatée de Kanzi ($P_1 = 0,62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1,24 \text{ t.ha}^{-1}$ et $P_3 = 2,48 \text{ t.ha}^{-1}$).

Figure 4 - Distribution of Ca, Mg, K and Na concentrations in exchangeable and leached fractions after 12 months incubation of sols with Kanzi rock phosphate ($P_1 = 0.62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1.24 \text{ t.ha}^{-1}$ and $P_3 = 2.48 \text{ t.ha}^{-1}$).



contribue efficacement à l'augmentation de la rétention en eau dans les sols étudiés. Un accroissement de rétention en eau de l'ordre de 5 % obtenu présente un intérêt agronomique considérable, et contribuerait à l'augmentation de la production agricole des sols sableux de l'hinterland de Kinshasa. L'action floculante assurée par les ions Ca générés par la dissolution de l'apatite pendant l'incubation des sols, aurait vraisemblablement contribué à l'augmentation de la rétention d'eau dans le sol.

pH du percolat

Le pH du percolat était mesuré trimestriellement. Sans aucune surprise, le pH du percolat était plus élevé dans les cylindres contenant la roche phosphatée de Kanzi, et augmente en fonction de l'accroissement de la dose d'application utilisée. Au cours de l'expérimentation, une augmentation graduelle et faible du pH a été observée dans les percolats issus des traitements avec le phosphate de Kanzi, alors que le pH du percolat témoin diminuait progressivement en fonction du temps d'incubation. Cette augmentation du pH du percolat est attribuée à l'augmentation progressive de l'alcalinité soluble comme conséquence

du lessivage des cations (*tableau 3*). L'accroissement de l'alcalinité soluble associée au lessivage des cations a été prouvée expérimentalement (Curtin et Smillie, 1986; Józefaciuk *et al.*, 1996; Curtin *et al.*, 1998). La faible variation temporelle du pH des percolats des sols amendés serait le résultat de l'accroissement du pouvoir tampon du sol induit par l'application de phosphate de Kanzi.

Lessivage des cations

Concernant le lessivage des cations (Ca, Mg, K et Na), l'analyse de la variance a mis en évidence une différence significative entre les traitements. En effet, les *tableaux 2 et 3* illustrent que les eaux de lessivage des terres amendées de roche phosphatée de Kanzi sont significativement ($p < 0,05$) plus concentrées en cations que celles issues des terres témoins, et que les concentrations augmentent en fonction de la dose d'application de la roche. L'étude montre que l'apport de 0,62, 1,24 et 2,48 t.ha⁻¹ de phosphate de Kanzi au sol, suivi d'un approvisionnement annuel de 1839,2 ml d'eau distillée, augmente le lessivage de la somme des cations (SCE) de 4,14 mmol_c.l⁻¹ (témoin) à 6,60, 7,00 et 7,69

Tableau 3 - Evolution du percolat en fonction du temps (0-12 mois) et de la dose d'application de la roche phosphatée de Kanzi ($P_1 = 0,62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1,24 \text{ t.ha}^{-1}$ et $P_3 = 2,48 \text{ t.ha}^{-1}$).

Table 3 - Evolution of leachate with time (0-12 months) and application rate of Kanzi rock phosphate ($P_1 = 0.62 \text{ t.ha}^{-1}$, $P_2 = 1.24 \text{ t.ha}^{-1}$ and $P_3 = 2.48 \text{ t.ha}^{-1}$).

Trait.	3 mois				6 mois				9 mois				12 mois			
	$^{\circ}V_A$ (ml)	$^{\circ}V_P$ (ml)	$^{\circ}SC_M$ (*)	$^{\circ}SC_m$ (*)	$^{\circ}V_A$ (ml)	$^{\circ}V_P$ (ml)	$^{\circ}SC_M$ (*)	$^{\circ}SC_m$ (*)	$^{\circ}V_A$ (ml)	$^{\circ}V_P$ (ml)	$^{\circ}SC_M$ (*)	$^{\circ}SC_m$ (*)	$^{\circ}V_A$ (ml)	$^{\circ}V_P$ (ml)	$^{\circ}SC_M$ (*)	$^{\circ}SC_m$ (*)
T	560	269,1	1,12	0,033	1057,5	503,7	2,28	0,068	1483,9	705,7	3,20	0,096	1839,2	871,8	4,14	0,122
P_1	560	246,2	1,85	0,012	1057,5	459,5	3,70	0,020	1483,9	638,4	5,30	0,025	1839,2	791,5	6,60	0,032
P_2	560	243,4	1,96	0,010	1057,5	455,2	3,87	0,016	1483,9	630,3	5,54	0,021	1839,2	780,7	7,00	0,027
P_3	560	243,6	2,24	0,008	1057,5	453,5	4,35	0,013	1483,9	628,9	6,07	0,018	1839,2	779,2	7,69	0,021

$^{\circ}$ = moyenne cumulative; V_A = volume ajouté; V_P = volume percolé; SC_M = somme des cations (Ca + Mg + K + Na); SC_m = somme des cation mineurs (Fe + Mn + Cu + Zn), (*) = ($\text{mmol}_c \cdot \text{l}^{-1}$), T = témoin.

$\text{mmol}_c \cdot \text{l}^{-1}$, respectivement. En revanche, ces apports diminuent le lessivage de la somme des microéléments (Fe, Cu, Zn, Mn) de $0,122 \text{ mmol}_{(+) } \cdot \text{l}^{-1}$ (témoin) à $0,032$, $0,027$ et $0,021 \text{ mmol}_{(+) } \cdot \text{l}^{-1}$, respectivement. Le lessivage de ces microéléments est, par conséquent, très limité dans les sols amendés, puisqu'ils restent fortement retenus dans le sol, à cause notamment de l'accroissement du pH du milieu induit par la roche phosphatée de Kanzi.

Le volume de percolat mesuré à chaque cycle d'incubation a permis de convertir les concentrations des cations en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Les valeurs obtenues ont été comparées aux teneurs en cations basiques échangeables (également exprimées en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) des sols à la fin de la première année d'expérimentation, afin de fournir quelques indications sur les pertes relatives des cations enregistrées à partir du système (figure 4). Il en résulte que les cations bivalents (Ca, Mg) sont moins lessivés que les ions monovalents (K, Na) dont la fraction lessivée a excédé dans certains cas la fraction échangeable dans le sol. Cette situation est attribuée à l'adsorption préférentielle des cations bivalents, repoussant ainsi les autres cations (monovalents) des sites d'échange et les prédisposant au lessivage et/ou à l'action directe des ions générés par la dissolution de la roche phosphatée de Kanzi. A titre d'illustration, l'application de $2,48 \text{ t.ha}^{-1}$ de la roche phosphatée de Kanzi, suivie d'un approvisionnement annuel de $1839,2 \text{ ml}$ d'eau distillée, produit une perte relative par lessivage de 14, 23, 47 et 53 % de Ca, Mg, K et Na, respectivement; leurs fractions échangeables respectives dans les sols étant de 86, 77, 53 et 47 % (figure 4).

CONCLUSION

Cette étude a permis de quantifier sur les moyen et long termes l'influence d'apport de roches phosphatées de Kanzi, finement broyées, et de réactivité moyennement élevée, sur les propriétés de terres sableuses sous climat tropical humide. L'apport de phosphate de Kanzi au sol a augmenté significa-

tivement: (i) le pH, (ii) le phosphore extractible par Bray 2, (iii) la somme des cations échangeables, (iv) la CEC, (v) la rétention en eau, et (vi) a réduit voire éliminé Al et Mn échangeables, donc potentiellement toxiques pour les cultures. L'analyse des propriétés des charges a révélé que l'accroissement significatif du pH et la diminution du pH_0 induits par la roche phosphatée de Kanzi, a sensiblement augmenté les charges négatives CEC_B et CEC_T au pH du sol avec réduction concomitante de la charge positive CEA. Concernant le lessivage des cations, l'étude montre que bien que l'apport de phosphate de Kanzi au sol ait favorisé un accroissement de la présence des cations bivalents (Ca, Mg) sur le complexe d'échange, la fraction relative transférée dans les percolats a été moins importante que celle des ions monovalents (K, Na). La roche phosphatée de Kanzi est, par conséquent, dotée des potentialités requises pour servir d'amendement naturel en utilisation directe important pour des sols acides sous climats tropicaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Appleton J.D., 1990. Rock and mineral fertilizers. *Appropriate Techn.*, 17, pp. 25-27.
- Brady N.C. et Weil R.R., 1994. The nature and properties of soils. Prentice Hall Intern. Ed. New Jersey ISBN. 0-13-243189-0. En particulier chapitre Soil reaction: Acidity and Alkalinity, pp 272-306
- Bruand A., Hartmann C. et Lesturges G., 2005. Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. In: *Proceedings of Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture*, Khon Kaen, Thailand. 27 Nov to 2 Dec 2005. pp. 148-158.
- Chien S.H., 1977. Dissolution of phosphate rocks in a flooded acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, pp. 1106-1109.
- Chien S.H. et Friesen D.K., 2000. Phosphate fertilizers and management for sustainable crop production in tropical acid soils. In IAEA, ed. *Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*, pp. 73-89. IAEA-TECDOC-1159. Vienna.

- Chien S.H. et. Hammond L.L., 1978. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rock for direct application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, pp. 1758-1760.
- Chien S.H., Hammond L. et Leon L.A., 1987. Long term reactions of phosphate rocks with an oxisol in Colombia. *Soil Sci.*, 144, pp. 257-265.
- Curtin D. et Smillie G.W., 1986. Effect of liming on soil characteristics and grass growth in laboratory and long term field-amended soils. I. *Soil Chemistry. Plant Soil*, 95,1, pp. 15-22.
- Curtin D., Campbell C. et Jalil A., 1998. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acid soils. *Soil Biol. Bioche.*, 30, pp. 57-64.
- Diamond, R.B. 1979. Views on marketing of phosphate rock for direct application. In IFDC, ed. *Seminar on phosphate rock for direct application. Special Publication SP-1. Muscle Shoals, USA, IFDC.*
- 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, pp.643-646.
- Gillman G., 2007. Analytical tools for understanding the properties and behaviour of variable charge soils. *Aust. J. Soil Research*, 45, pp. 83-90.
- Gillman G. et Sumpter E., 1986. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 24, pp. 61-66.
- FAO, 2001. Evaluation de l'efficacité agronomique des phosphates naturels pour l'application directe en Afrique de l'Ouest: synthèse des résultats agronomiques expérimentaux, by Bizimungu G., Roy R.N. et Burgos W., Rome.
- FAO, 2004. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable, division mixteFAO/AIEA, Rome.
- Hu H.Q., Li X.Y., Liu J.F., Liu F.L., Xu L. et Liu F., 1997. The effect of direct application of phosphate rock on increasing crop yield and improving properties of red soil. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 46, pp. 235-239.
- IUSS Working Group WRB, 2006. World reference base for soil resources 2006. 2nd edn. *World Soil Resources Report No. 103. FAO, Rome.*
- Jadin P. et Truong B., 1987. Efficacité de deux phosphates naturels tricalciques dans deux sols ferrallitiques acides du Gabon. *Café Cacao Thé*, Vol. XXXI, n° 4: 291-302.
- Józefaciuk G., Sokolowska Z., Hajnos M., Hoffmann C. et Renger M., 1996. Large effect of leaching of DOC on water adsorption properties of a sandy soil. *Geoderma*, 74, pp. 125-137.
- Kasongo R.K., Van Ranst E., Verdoodt A., Kanyankogote P. et Baert G., 2009. Impact of *Acacia auriculiformis* on the chemical fertility of sandy soils on the Batéké plateau, D.R. Congo. *Soil Use and Management*, 25, pp. 21-27.
- Koy Kasongo R., 2009. Amélioration de la qualité des sols sableux du plateau des Batéké par application des matériels géologiques et des déchets organiques industriels locaux. Thèse de doctorat (Ph.D.) en Science de la Terre, Université de Gand, Belgique.
- Landon J.R., ed. 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.*
- Leonardos O.H., Theodora S.H. et Assad M.L., 2000. Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. *Nutr. Cycling Agroecosys.*, 56, pp. 3-9.
- Maene L.M., 2003. Direct application of phosphate rock: a global perspective of the past, present, and future. In Rajan S.S., et Chien S.H., eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16 to 20 July 2001. Muscle Shoals, USA, IFDC.*
- Mupepele, L., Intiomale J.P. et Kabonwa J. 2004. The phosphate deposits of Bas-Congo in the Democratic Republic of the Congo. *BICOTIM, Kinshasa, R.D. C.*
- Qafoku P., Van Ranst E., Noble A. et Baert G., 2004. Variable charge soils: Their mineralogy, chemistry and management. *Advances in Agronomy*, 84, pp. 159-215.
- Rowell D.L. et Wild A., 1985. Causes of soil acidification: a summary. *Soil Use Manag.*, 1, pp. 32-33.
- Sanchez P.A., 2002. Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 295, pp. 2019-2020.
- Sikora F.J., 2002. Evaluating and quantifying the liming potential of phosphate rocks. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 63,1, pp. 59-67.
- Sinclair A.G., Shannon P.W. et Risk W.H., 1990. Sechura phosphate rock supplies plant-available molybdenum for pastures. *N. Z. J. Ag. Res.*, 33, pp. 499-502.
- Soil Survey Staff, 2006. *Keys to soil Taxonomy, 10th edition. Soil Conservation Service, USDA. Washington D.C.*
- Van Straaten P., 2007. *Agrogeology: The use of rocks for crops. Enviroquest Limited., Cambridge, Ontario, Canada.*
- Van Ranst E., Verloo M., Demeyer A. et 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.*
- Uehara G. et Gillman G., 1980. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals. I. Theory. *Soil Sci. Am. J.*, 44, pp. 250-252.
- Wann S. et Uehara G., 1978. Surface charge manipulation in constant surface potential colloids: I. Relation to sorbed phosphorus. *Soil Sci. Am. J.*, 42, pp. 565-570.