

Effet de la lave trachybasaltique broyée sur les propriétés chimiques de sols de climat tropical humide

P. Kanyankogote₍₁₎, E. Van Ranst₍₂₎, A. Verdoodt₍₂₎ et G. Baert₍₃₎

- (1) Laboratoire de Pédologie, Université de Kinshasa, B.P. 190 Kin.XI, République Démocratique du Congo.
(2) Département de Géologie et de Pédologie, Laboratoire des Sciences du Sol, Université de Gand, Krijgslaan 281 (S8), Gent B-9000, Belgique.
(3) BIOT, Département de Chimie du Sol et Nutrition Végétale, Hogeschool Gent, Voskenslaan 270, Gent B-9000, Belgique.

RÉSUMÉ

Dans cette étude, de la lave broyée à 3 tailles différentes de particules (0,5 – 4 mm ; 0,1 – 0,5 mm ; < 0,1 mm) a été mélangée avec des sols de climat tropical humide à des doses de 10, 25 et 50 t ha⁻¹, et l'incubation conduite pendant 3, 6, 9, et 12 mois. Les sols traités, Ultisols et Oxisols en provenance d'Afrique et d'Asie du Sud-Est, présentent une fraction argileuse constituée essentiellement de kaolinite, goethite et gibbsite. Ces sols sont acides à très acides, présentent une CEC faible, un déséquilibre de la balance cationique au détriment du calcium et du magnésium, et des teneurs élevées en aluminium échangeable, à la limite de la toxicité. L'application de lave trachybasaltique broyée entraîne une augmentation considérable du pH, de la CEC et de la teneur en cations échangeables. La balance cationique est améliorée et l'aluminium échangeable est complètement neutralisé dans la plupart des cas.

Mots clés

Sols tropicaux acides, lave broyée, CEC à charges variables

SUMMARY

EFFECT OF GROUND TRACHYBASALTIC LAVA ON THE CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS OF THE HUMID TROPICS

In this study, ground trachybasaltic lava at different sizes was mixed with soils of the humid tropics at a rate of 10, 25 and 50 t ha⁻¹ and left for an incubation time of 3, 6, 9 and 12 months. The treated soils, Ultisols and Oxisols from Africa and South-East Asia, have a clay fraction containing mainly kaolinite, goethite and gibbsite. The soils are acid with a low CEC and have a cation balance showing deficiencies in calcium and magnesium and high amount of exchangeable aluminium, near toxicity level. The use of trachybasaltic lava brings about an increase of pH, CEC, and the amount of exchangeable cations. The cation balance has improved and the exchangeable aluminium is completely neutralised in most soils.

Key-words

Acid tropical soils, ground lava, CEC with variable charges.

RESUMEN**EFECTO DEL LAVA TRAQUIBASÁLTICA MOLIDA SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS BAJO CLIMA TROPICAL HÚMEDO**

En este estudio, se mezcló lava molida a tres diferentes tamaños de partículas (0,5 – 4 mm ; 0,1 – 0,5mm ; < 0,1mm) con suelos sometido a clima tropical húmedo con dosis de 10, 25 y 50 t/ha, la incubación fue conducida durante 3, 6, 9, y 12 meses. Los suelos tratados, Ultisoles y Oxisoles en procedencia de Africa y Asia del Sur-Este, presentan una fracción arcillosa constituida esencialmente de kaolinita, goetita y gibsita. Estos suelos son ácidos a muy ácidos, presentan una CIC pequeña, un desequilibrio del balance catiónico por el calcio y el magnesio, y de los contenidos elevados en aluminio intercambiable, al límite de la toxicidad. La aplicación de lava traquibasáltica molida permite un aumento considerable del pH, de la CIC y del contenido en cationes intercambiables. El balance catiónico se mejora y el aluminio intercambiable esta completamente neutralizado en la mayoría de los casos.

Palabras clave

Suelos tropicales, lava molida, CIC con cargas variables.

En régions équatoriales et tropicales humides, caractérisées par des températures élevées et des fortes pluviosités, les sols sont soumis à une altération et un lessivage intenses et continus. Il s'ensuit alors une désaturation du complexe adsorbant, et une acidification plus ou moins forte, qui diminuent la fertilité chimique des sols. Par ailleurs, la forte altération à laquelle sont soumis ces sols affecte aussi leur composition minéralogique ; on y trouve dans les sols les plus altérés des argiles de type kaolinite, des oxydes de fer, d'aluminium et de titane, ainsi que des minéraux résistants tels que le quartz et la muscovite. Certains oxyhydroxydes (Fe, Al) leur donnent une charge de surface variable (Schroth et Sposito, 1997 ; Qafoku *et al.*, 2004) et une forte rétention du phosphore sous forme non ou peu assimilable. Ces sols présentent une faible réserve d'éléments nutritifs, une forte rétention de P, une faible capacité d'échange de cations (CEC) et un haut point de charge zéro. La baisse catastrophique de la teneur en matières organiques après culture prolongée réduit fortement la rétention de bases échangeables et le stock de P assimilable. L'acidification provoque aussi des toxicités en certains éléments (Al, Mn, Cu, ...). L'exploitation de tels sols exige le relèvement du pH et de la capacité d'échange cationique, la neutralisation de l'aluminium échangeable et la restauration de la balance cationique. On recourt généralement au chaulage en vue de neutraliser l'acidité, plus particulièrement celle associée à l'aluminium échangeable, et d'améliorer d'autres propriétés du sol. Cependant dans les sols fortement altérés, le relèvement du pH jusqu'à des valeurs de 6 à 7, requiert de gros apports en chaux ; en outre ceux-ci restent inefficaces à cause de l'effet tampon élevé que présentent ces sols. De plus, de tels apports peuvent entraîner des déficiences en phosphore et en micronutriments tels que Zn, Mn, B (Noble et Hurney, 2000) et accentuer le déséquilibre ou le déficit en Mg et K. C'est pourquoi depuis quelques décennies, d'autres matériaux, essentiellement des silicates, phosphates et sulfates, ont été testés au lieu du calcaire. Ces matériaux ont les mêmes effets favorables que le calcaire, mais ont l'avantage de ne pas créer d'effet contraire (Ayeres, 1966 ; Gillman, 1980 ; Alva *et al.*, 1990 ; Gillman *et al.*, 2001).

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'effet bénéfique d'un apport de lave trachybasaltique broyée sur les propriétés chimiques des sols tropicaux fortement altérés.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

La lave utilisée provient du volcan Nyiragongo (coulée de 1977), l'un des grands cônes volcaniques de la branche occidentale du rift Est Africain. Des échantillons ont été prélevés sur 6 sites représentatifs d'une même lave. L'étude pétrographique de cette lave montre qu'elle est constituée d'un verre basaltique sombre et de cristaux de labrador, d'augite, d'apatite et de néphéline. Dans la masse basaltique, on observe des traces de ponces contenant du quartz, de la sillimanite et un peu de microcline. L'analyse chimique montre une grande homogénéité de la lave dans les différents sites de pré-

lèvement. La composition chimique moyenne est la suivante (en %) : SiO₂ : 39,67 ; Al₂O₃ : 15,39 ; Fe₂O₃ : 13,63 ; CaO : 11,89 ; MgO : 3,64 ; K₂O : 5,31 ; Na₂O : 5,53 ; MnO : 0,27 ; TiO₂ : 2,77 ; P₂O₅ : 1,31 ; H₂O⁺ : 0,44. Il s'agit d'une lave trachybasaltique avec des teneurs voisines en alcalins (K et Na).

Les sols mis à l'étude sont des Ultisols et Oxisols en provenance d'Afrique (R.D. Congo) et d'Asie du Sud-Est (Malaisie), numérotés comme suit :

1. Ultisol sur granite, R.D. Congo ;
2. Ultisol sur schiste, R.D. Congo ;
3. Ultisol sur granite, Série Rengam, Malaisie ;
4. Ultisol sur ardoise rouge, Série Bungor, Malaisie ;
5. Ultisol sur grès, Série Serdang, Malaisie ;
6. Oxisol sur ardoise, Série Prang, Malaisie ;
7. Oxisol sur andésite, Série Segamat, Malaisie.

Pour chaque sol, un échantillon composite de surface (0 – 15 cm) a été prélevé, séché à l'air libre dans une salle exempte de poussières et tamisé sur un tamis de 2 mm. Les caractéristiques physico-chimiques suivantes ont été déterminées : pH H₂O et pH KCl par la méthode de Peech (1965), dans un mélange sol-solution 1/1 ; carbone organique par la méthode de Walkley et Black (1965) ; la CEC et les cations échangeables par la méthode à l'acétate d'ammonium pH 7 ; et l'aluminium échangeable par la méthode au KCl 1 N. Le dosage des éléments extraits a été réalisé par spectrométrie d'absorption atomique. La minéralogie de la fraction argileuse a été déterminée par diffraction aux rayons X sur des lames orientées séchées à l'air, avec un diffractomètre Philips (PW 1050/25) en utilisant une anticathode au cobalt (radiation Co K α).

En vue de mettre en évidence l'effet fertilisant de la lave sur les différents sols tropicaux fortement altérés décrits ci-dessus, plusieurs expériences dans des cylindres PVC de 3 mm d'épaisseur, 200 mm de hauteur et 56 mm de diamètre intérieur, ont été menées au Laboratoire des Sciences du Sol à l'Université de Gand, pour tous les sols pendant 9 mois, et sur le terrain, au Nord-Est de la R.D. Congo, pour une durée de 12 mois sur les deux Ultisols de R.D. Congo. Dans chaque cylindre, après avoir bouché la partie inférieure par de l'ouate retenue par un adhésif en plastique, 450 g de sol tamisé à 2 mm ont été placés et mélangés intimement à de la lave broyée à 3 tailles de particules : grossière (0,5 – 4 mm), moyenne (0,1 – 0,5 mm) ou fine (< 0,1 mm) ; la dose étant de 10, 25 ou 50 t ha⁻¹. Dans l'expérience au laboratoire, après avoir amené le sol contenu dans le cylindre à sa capacité au champ, chaque semaine, une quantité d'eau correspondant à la pluie effective estimée pour la R.D. Congo (Nord-Est) a été ajoutée. Dans l'essai sur le terrain, le cylindre d'essai est entouré par un cylindre de protection jusqu'à 10 cm de la surface du sol pour éviter des contaminations éventuelles, et les sols sont soumis aux conditions climatiques naturelles. Pour chaque sol étudié, un témoin (blanc) est soumis aux mêmes conditions d'expérience et deux répétitions sont réalisées. Tous les trois mois, les cylindres sont enlevés et les sols séchés puis tamisés à 2 mm.

Un échantillon représentatif est prélevé et le pH, la CEC et les cations échangeables sont déterminés suivant les mêmes méthodes que précédemment.

Un Ultisol (sol n° 4) et un Oxisol (sol n° 6) de Malaisie ont reçu des doses de lave équivalentes à 10, 25 et 50 t ha⁻¹ et ont été laissés au repos pendant une durée bien déterminée. Pour la détermination de la fixation du phosphore, des doses de 0 à 500 mg l⁻¹ de KH₂PO₄ ont été ajoutées aux sols. La teneur en phosphore fourni a été ensuite déterminée par extraction au lactate d'ammonium.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Minéralogie de la fraction argileuse

Les résultats obtenus sont présentés dans le *tableau 1*. La fraction argileuse de tous les Ultisols est essentiellement constituée de kaolinite, de quartz en faible quantité et de micas en traces. Les Ultisols de Malaisie, à l'exception de l'Ultisol sur grès, contiennent en plus de la goéthite, de la gibbsite et des minéraux interstratifiés gonflants (mica-smectite) ou non (mica-vermiculite). Quant aux Oxisols ils contiennent de la kaolinite, de la goéthite, de la gibbsite (sol n° 6 uniquement) et des interstratifiés peu gonflants. Des sols comparables, où sont associés la kaolinite et les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, présentent généralement une faible charge permanente négative et une charge variable beaucoup plus importante (Wieland et Stumm, 1992 ; Arias *et al.*, 1995 ; Qafoku *et al.*, 2004). Les données antérieures concernant les sols de Malaisie sélectionnés (Joseph, 1977), et l'analyse des caractéristiques physico-chimiques (*tableau 1*) par rapport aux valeurs optimales de pH (5,5 – 6,5), de la balance cationique Ca/Mg/K (76/18/6), et des teneurs en cations échangeables : Ca²⁺ (1,52 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹sol), Mg²⁺ (0,36 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹sol) et K⁺ (0,40 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹sol) (Sys, 1983) montrent qu'il s'agit, à l'exception de l'Ultisol sur granite du Congo (sol n° 1), de sols acides à très acides, pauvres en cations échangeables, présentant un déséquilibre cationique au détriment du Ca et du Mg et des teneurs élevées en Al, à la limite de la toxicité (Van Ranst, 1995). Mis à part l'Ultisol sur schiste du Congo (sol n° 2), riche en matière organique, tous les sols présentent une CEC faible, généralement inférieure à 16 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ sol, parfois proche du seuil critique de 4 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹sol.

pH et acidité d'échange

L'application de la lave a fait augmenter sensiblement le pH(H₂O) de sols traités, aussi bien au laboratoire que sur le terrain, jusqu'à plus de 2 unités de pH dans certains sols. D'une manière générale plus la lave est fine et la dose appliquée élevée plus l'effet est important (*figure 1*). Dans l'Ultisol (sol n° 1) ne contenant pas d'aluminium échangeable (*figure 1a-1*) l'accroissement de pH est très rapide et forte aussi bien en laboratoire que sur le terrain (*figure 1b-1*), les

valeurs de pH atteintes restant élevées (pH 7 à 8), même après 9 ou 12 mois de repos. Dans les autres Ultisols contenant des quantités importantes d'aluminium échangeable (*figure 1a-2,3,4, et 5 ; figure 1b-2*) l'augmentation de pH est lente et exige des doses élevées (25 à 50 t ha⁻¹) et un temps d'équilibration assez long (6 mois au moins) pour atteindre des valeurs de pH proches ou supérieures à 6. Dans les Oxisols (*figure 1a-6 et 7*), l'accroissement du pH est beaucoup plus lent et atteint des valeurs de pH 5,9 aux doses de lave les plus élevées (50 t ha⁻¹) après 9 mois d'incubation. Cette élévation du pH peut être expliquée par le double effet suivant (Van Ranst, 1995) : (1) rupture des liaisons silicium-oxygène-métal des silicates amorphes (verre volcanique) et autres aluminosilicates (néphéline etc.) facilement altérables contenus dans la lave suivant la réaction : Si-O-M → Si-O⁻ + M⁺ ; (2) hydrolyse de l'anion Si-O⁻ avec augmentation du pH par libération d'OH⁻ de l'eau. En effet, cet anion d'un acide très faible (H₄SiO₄ de pK_{a1} = 9,5) est très instable, et s'hydrolyse spontanément avec augmentation de l'alcalinité. Toutefois en présence d'aluminium échangeable (sols 2 à 7), toute augmentation de pH entraîne l'hydrolyse des cations Al³⁺ en Al(OH)²⁺ puis Al(OH)₃ avec libération de H⁺ (Van Lierop et Sentran, 1979). L'élévation de pH est ainsi tamponnée.

Par ailleurs, l'acide monosilicique formé lors de l'hydrolyse des silicates possède une grande affinité pour les hydroxydes de fer et d'aluminium présents dans ces sols, surtout les Oxisols, et réagit préférentiellement avec leurs groupements hydroxyles comme suit (Hingston et Raupach, 1967) :



Cette deuxième série de réactions libère des protons ou hydrogènes et s'oppose à l'action bénéfique de l'hydrolyse des silicates. Par conséquent, on ne peut espérer une nette augmentation du pH jusqu'à des valeurs proches de 6,5 (ce qui implique la neutralisation et l'élimination complète de l'aluminium échangeable) que lorsque la réaction d'hydrolyse des silicates domine toutes les autres réactions antagonistes susceptibles d'avoir lieu dans ces sols. Cette condition est remplie lorsque les doses appliquées sont supérieures à 25 t ha⁻¹ de lave moyenne et surtout fine, pour la plupart de sols étudiés.

CEC et charge de surface

La CEC, qui représente la somme des charges négatives, de la plupart des sols a augmenté de 1,5 à 2 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ de sol, après trois mois d'incubation pour l'Ultisol sur granite (sol n° 1) (*figure 2a*), l'Ultisol sur schiste (sol n° 2) (*figure 2b*) et l'Ultisol sur granite (Malaisie) (*figure 2c*). Quant à l'Oxisol sur ardoise (sol n° 6), un accroissement sensible de la CEC est observé après neuf mois d'incubation avec une fraction de lave broyée moyenne ou fine (*figure 2d*). Certes l'accroissement observé n'est pas très important, mais il est significatif s'agissant de sols qui ont des systèmes de charges variables (Uehara et Gillman, 1981), surtout pour ceux riches en oxyhydroxydes de Al et Fe mal cristallisés qui présentent une charge nette positive (dépendante du pH).

Tableau 1 - Propriétés des sols étudiés

Table 1 - Properties of the studied soils

Sol n°	1	2	3	4	5	6	7
Minéralogie	K,M,Q	K,Q,M	K,M,Q,Gt Gb,M-S,M-V	K,M,Q,Gt, Ch,M-S,Ch-S	K,M,Q M-V	K,Gt,Gb, M,F,M-V	K,Gt,M M-V
pH _{H₂O}	6,3	5,1	4,3	4,1	4,6	4,8	4,4
C.O (%)	0,58	4,35	-	-	-	-	-
CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹ sol)	6,40	26,40	11,76	9,04	4,32	12,40	15,12
Ca ⁺⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹ sol)	2,40	0,41	1,00	0,25	0,07	0,64	0,95
Mg ⁺⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹ sol)	0,50	0,25	0,42	0,16	0,05	0,13	0,98
K ⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹ sol)	0,40	0,30	0,36	0,13	0,05	0,10	0,16
Na ⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹ sol)	0,10	0,15	0,15	0,15	0,09	0,37	0,17
Al ³⁺ (cmol ⁺ kg ⁻¹ sol)		4,15					
Saturation des bases (%)	53	4	16	8	6	10	15

K = kaolinite, M = mica, Q = quartz, Gt = goethite, Gb = gibbsite, M-S = mica-smectite, M-V = mica-vermiculite, Ch = chlorite, Ch-S = chlorite-smectite et F = feldspath.

Figure 1 - pH des 7 sols après six mois d'essai au laboratoire (a) et sur le terrain (b), avec de la lave finement broyée
 Figure 1 - pH of the 7 soils after six months incubation time in the laboratory (a) and in the field trials (b), with fine ground lava

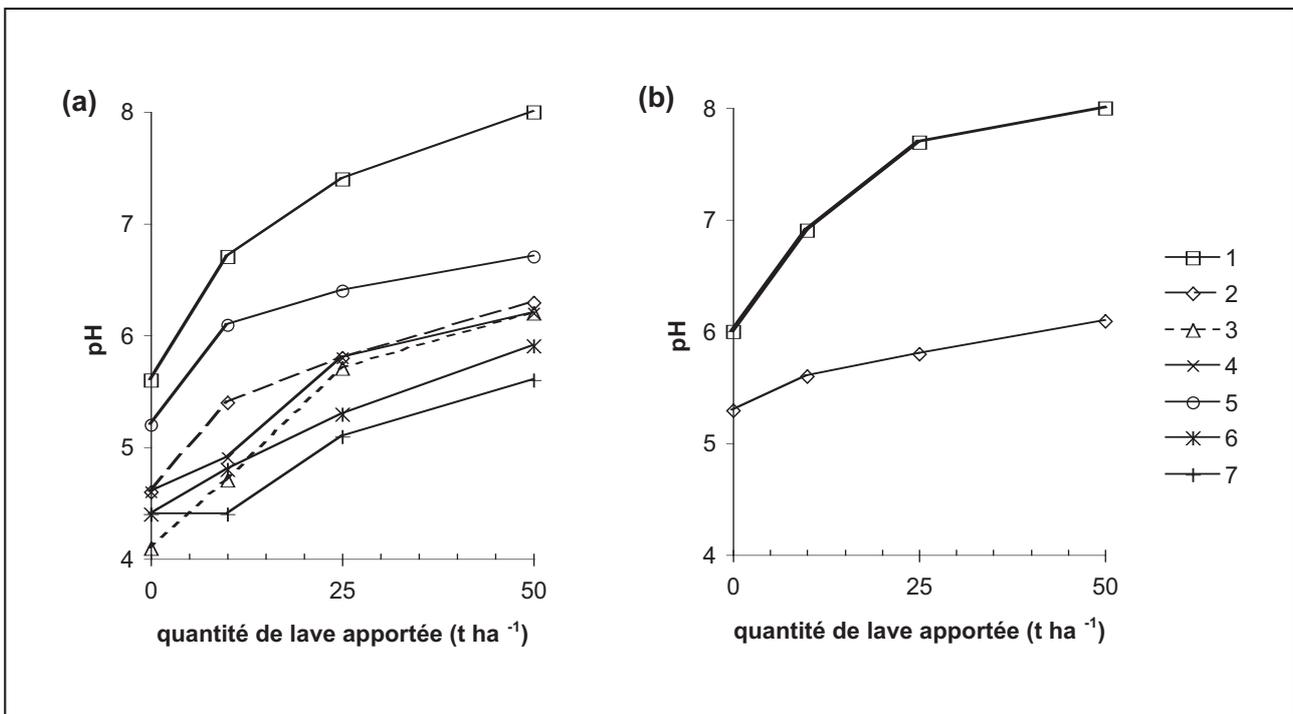
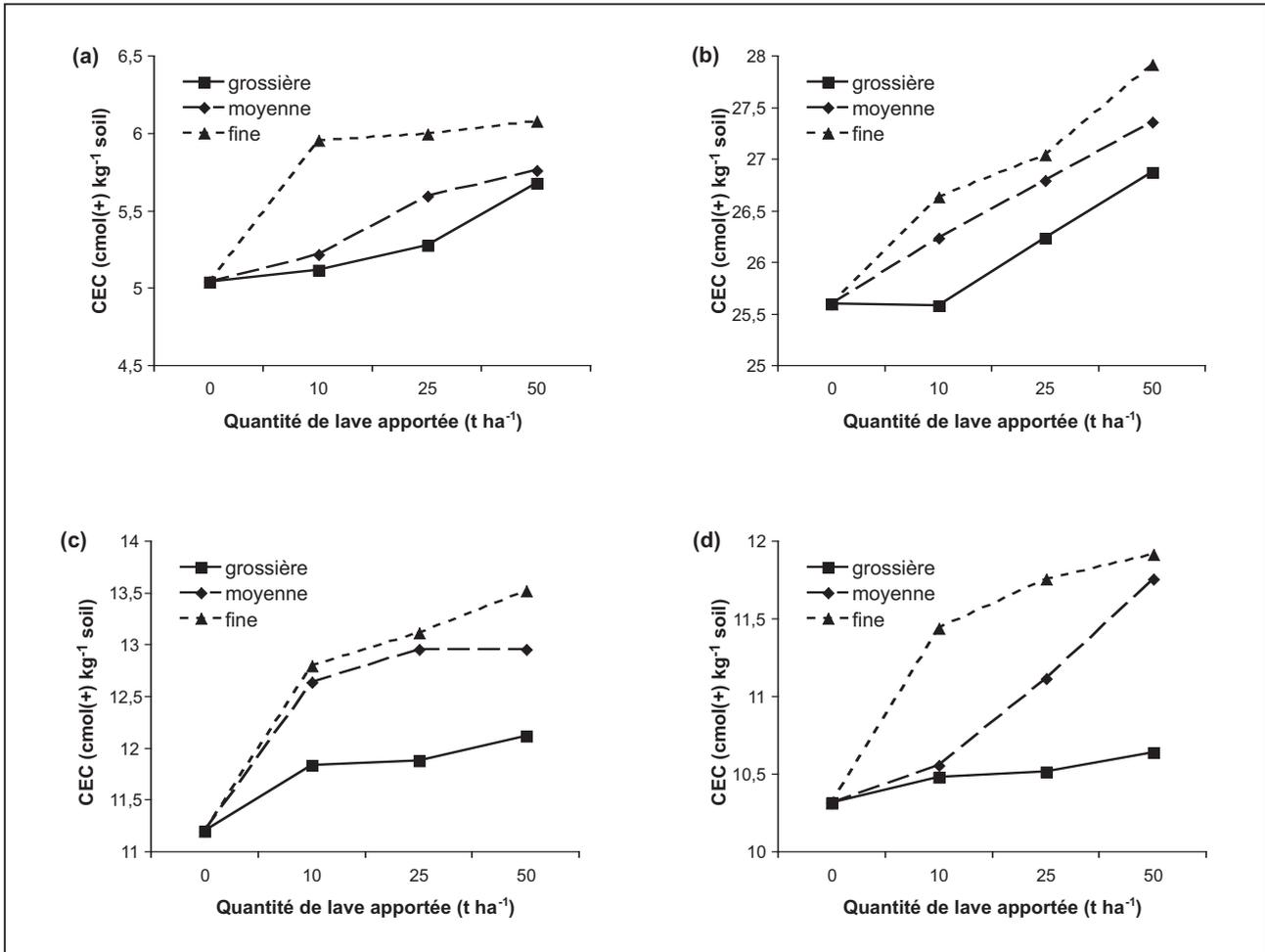


Figure 2 - Effet de la dose et de la taille des particules de lave sur la CEC des Ultisols n° 1, 2 et 3 (a, b, et c) et de l'Oxisol n° 6 (d) après respectivement trois et neuf mois d'incubation

Figure 2 - Effect of dose and lava particle size on CEC of Ultisols 1, 2 and 3 (a,b and c) and the Oxisol 5 (d) after three and nine months of incubation respectively



Certains des sols étudiés présentent une faible charge permanente négative, étant donné qu'ils contiennent de faibles teneurs de minéraux présentant le phénomène de substitution isomorphique dans leur structure. Par ailleurs, les oxyhydroxides forment des associations avec la kaolinite qui provoquent la réduction du nombre de charges négatives sur celle-ci (Arias *et al.*, 1995). Selon l'équation de Gouy-Chapman et Nernst :

$$\sigma_v = (2n \varepsilon RT / \pi)^{1/2} \sinh 1,15z (pH_0 - pH)$$

où

pH_0 : point de charge zéro du sol ;

pH : pH de la solution du sol.

Ainsi pour obtenir une augmentation de la charge négative, il faut accroître le paramètre $(pH_0 - pH)$; ce qui peut être atteint par aug-

mentation du pH ou diminution du pH_0 . L'apport de lave trachybasaltique broyée offre cette opportunité. En effet, non seulement il fait augmenter sensiblement le pH du sol, mais il libère aussi des anions silicate en quantité importante qui, d'une part, neutralisent l'aluminium échangeable, et surtout, d'autre part, en se combinant avec Al et Fe hydrolysés, créent des charges négatives, qui abaissent ainsi le pH_0 . Ce processus influe sur la force ionique dans la solution du sol et contribue à l'accroissement de la CEC (Wann et Uehara, 1978 ; Gillman, 1981 ; Liang *et al.*, 2000).

Cations échangeables et balance cationique

D'une manière générale, l'apport de lave broyée au sol fait augmenter de façon rapide, continue et importante la teneur en cations alcalino-terreux, Ca^{2+} et Mg^{2+} , cations les plus déficients dans la plu-

part des sols concernés. Quant aux cations alcalins, le niveau du K^+ augmente légèrement alors que celui du Na^+ augmente fortement. La teneur en cations échangeables nutritifs (Ca, Mg, K) est amenée dans l'intervalle optimal pour la nutrition des plantes et même au-delà pour tous les sols (tableaux 2 à 4). Ainsi lorsqu'on considère un temps d'incubation de trois mois et une dose de 50 t ha^{-1} de lave fine (tableau 2), on constate que dans l'Ultisol sur grès, Ca^{2+} passe de 0,07 à $1,60 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ sol, Mg^{2+} de 0,02 à $0,48 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ sol et K^+ de 0,00 à $0,31 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ sol, tandis que dans l'Oxisol sur ardoise, Ca^{2+} passe de 0,39 à $2,91 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ sol, Mg^{2+} de 0,13 à $0,85 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ sol et K^+ de 0,09 à $0,49 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ sol, soit une amélioration rapide et très satisfaisante des sols les plus déficients en cations échangeables. La balance cationique, bien que n'ayant atteint les valeurs optimales que dans quelques sols, a tout de même été nettement améliorée. L'enrichissement net en cations échangeables du complexe adsorbant (gain par rapport au témoin), exprimé en % de la CEC, est rapide et augmente avec le temps (tableaux 2 à 4) et avec la diminution de la taille des particules de lave broyée (figure 3). Plus la taille est fine et le temps de contact long, plus l'enrichissement est élevé. Dans les Ultisols l'enrichissement du complexe adsorbant est hiérarchisé, à quelques exceptions près, du $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$, en début d'expérience, et évolue vers $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$ en fin d'expérience (figures 3a, b, et c). On observe un accroissement allant jusqu'à 49% pour Ca^{2+} (figure 3a), 14 à 26% pour Mg^{2+} (figures 3a et b), 10% pour Na^+ (figure 3b) et de 4 à 6% pour K^+ (figures 3a et c). L'importance relative de Na^+ par rapport à la CEC

dépasse parfois le seuil critique de 5% de la CEC à partir duquel cela pourrait affecter certaines plantes ; mais ce risque est limité, car dans les cas considérés (sols n° 3 et 6), le pH final est < 7 et la somme élevée de $(Ca+Mg+K)/Na$ contrebalance dans la solution nutritive la capacité d'assimilation de Na par la plante. Dans l'Ultisol sur granite de Malaisie (sol n° 3) riche en minéraux 2:1, on note un plus fort enrichissement en Mg^{2+} (figure 3b) en début d'expérience (tableau 2) dû à son adsorption réversible par la vermiculite et un niveau très faible du K^+ dû probablement à l'adsorption de celui-ci de façon irréversible par les minéraux micacés en voie de transformation (M-V, M-S), contenus dans ce sol (Bolt et Bruggenwert, 1976). L'enrichissement du complexe adsorbant en potassium ne peut alors être réalisé que lorsque la quantité fournie est supérieure à celle requise pour saturer les sites responsables d'une telle adsorption ; ce qui semble être le cas lorsque le temps d'interaction sol-basalte est plus long (six mois) (figure 3b). Dans les Oxisols, l'enrichissement du complexe adsorbant est le même que dans les Ultisols, le Ca^{2+} et le Na^+ restent les cations les plus extraits et retenus par les sols (figure 3c). Mais, mis à part le Ca^{2+} , l'enrichissement du complexe adsorbant est plus faible. Ceci peut être expliqué par la persistance de l'aluminium échangeable et de quelques sites chargés positivement, non encore neutralisés, qui exercent une répulsion sur les cations, retardant ainsi leur adsorption. La nature du sol peut donc influencer la quantité relative et l'ampleur de l'enrichissement du complexe adsorbant en cations échangeables.

Tableau 2 - Cations échangeables après trois mois d'incubation pour un apport de 50 t ha^{-1} de fraction fine de lave broyée

Table 2 - Amounts of exchangeable cations after three months of incubation with a dose of 50 t ha^{-1} of fine fraction of ground lava

Type de sol	1		2		3		4		5		6		7	
	B*	ST**	B	ST										
pH-H ₂ O	5,1	7,7	4,9	6,1	4,3	5,6	4,5	5,8	4,9	6,3	4,7	5,4	4,5	5,5
Ca ⁺⁺	2,20	5,04	0,42	3,04	0,99	3,60	0,59	2,59	0,07	1,60	0,39	2,91	1,12	3,96
Mg ⁺⁺	0,31	1,20	0,23	1,15	0,42	3,41	0,14	0,81	0,02	0,48	0,13	0,85	1,02	1,90
K ⁺	0,35	0,50	0,29	0,90	0,29	0,29	0,10	0,32	0,00	0,31	0,09	0,49	0,25	0,54
Na ⁺	0,09	0,49	0,09	1,48	0,07	1,17	0,09	0,61	0,06	0,54	0,13	0,84	0,20	1,31
CEC	5,0	6,1	25,6	27,9	11,2	11,5	7,2	8,0	3,9	4,3	10,9	11,5	14,2	13,6
BS	59	119	4	24	16	74	13	54	4	68	7	44	18	57

B* : blanc, ST** : sol traité

Bases échangeables et CEC en $\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ sol, BS en %

Tableau 3 - Cations échangeables après six mois d'incubation pour un apport de 50 t ha⁻¹ de fraction fine de lave broyée**Table 3** - Amounts of exchangeable cations after six months of incubation with a dose of 50 t ha⁻¹ of fine fraction of ground lava

Type de sol	1		2		3		4		5		6		7	
	B*	ST**	B	ST										
pH-H ₂ O	5,6	8,0	4,6	6,3	4,1	6,2	4,6	6,2	5,2	6,7	3,9	5,8	4,4	5,6
Ca ⁺⁺	2,01	4,50	0,43	3,17	0,73	4,22	0,36	2,75	0,09	1,76	0,24	3,11	1,27	4,98
Mg ⁺⁺	0,42	1,05	0,17	1,22	0,26	1,23	0,16	0,83	0,06	0,48	0,04	0,90	1,04	2,03
K ⁺	0,26	0,39	0,25	1,18	0,29	0,50	0,07	0,44	0,05	0,33	0,09	0,67	0,13	0,72
Na ⁺	0,08	0,20	0,17	1,73	0,15	1,09	0,21	0,94	0,09	0,60	0,14	0,84	0,20	1,27
CEC	5,1	5,7	25,1	23,0	11,2	12,2	8,2	8,7	4,2	5,0	8,8	9,3	16,4	15,5
BS	54	108	4	32	13	58	10	57	7	64	6	60	16	58

B* : blanc, ST** : sol traité

Bases échangeables et CEC en cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹sol, BS en %

Effet de la lave sur l'état du phosphore des sols

Tableau 4 - Cations échangeables après neuf mois d'incubation pour un apport de 50 t ha⁻¹ de fraction fine de lave broyée**Table 4** - Amounts of exchangeable cations after nine months of incubation with a dose of 50 t ha⁻¹ of fine fraction of ground lava

Type de sol	1		2		3		4		5		6		7	
	B*	ST**	B	ST										
pH-H ₂ O	5,8	8,0	4,5	6,0	4,4	6,0	4,5	6,0	4,8	6,6	4,4	5,9	4,5	5,8
Ca ⁺⁺	2,08	4,86	0,30	3,42	0,86	4,36	0,21	3,25	0,20	2,19	2,14	3,64	0,99	5,30
Mg ⁺⁺	0,21	0,94	0,15	1,83	0,25	1,23	0,09	0,50	0,03	0,42	0,66	0,68	0,48	
K ⁺	0,28	0,41	0,20	1,25	0,19	0,41	0,09	0,52	0,08	0,44	0,07	0,71	0,14	0,77
Na ⁺	0,13	0,14	0,13	1,68	0,17	0,93	0,13	0,72	0,09	0,61	0,08	0,60	0,12	1,00
CEC	4,8	5,3	22,4	23,9	11,0	9,8	7,0	7,0	3,8	4,3	10,3	11,9	14,7	12,7
BS	56	120	5	34	13	71	6	71	10	85	29	47	12	

B* : blanc, ST** : sol traité

Bases échangeables et CEC en cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹sol, BS en %

Figure 3 - Enrichissement net du complexe adsorbant en fonction du temps et de la taille des particules de lave broyée (50 t ha⁻¹) dans les sols n° 1 (a), 3 (b) et 6 (c)

Figure 3 - Net enrichment of the absorption complex in function of time and lava particle size (50 t ha⁻¹) of soils 1 (a), 3 (b) and 6 (c)

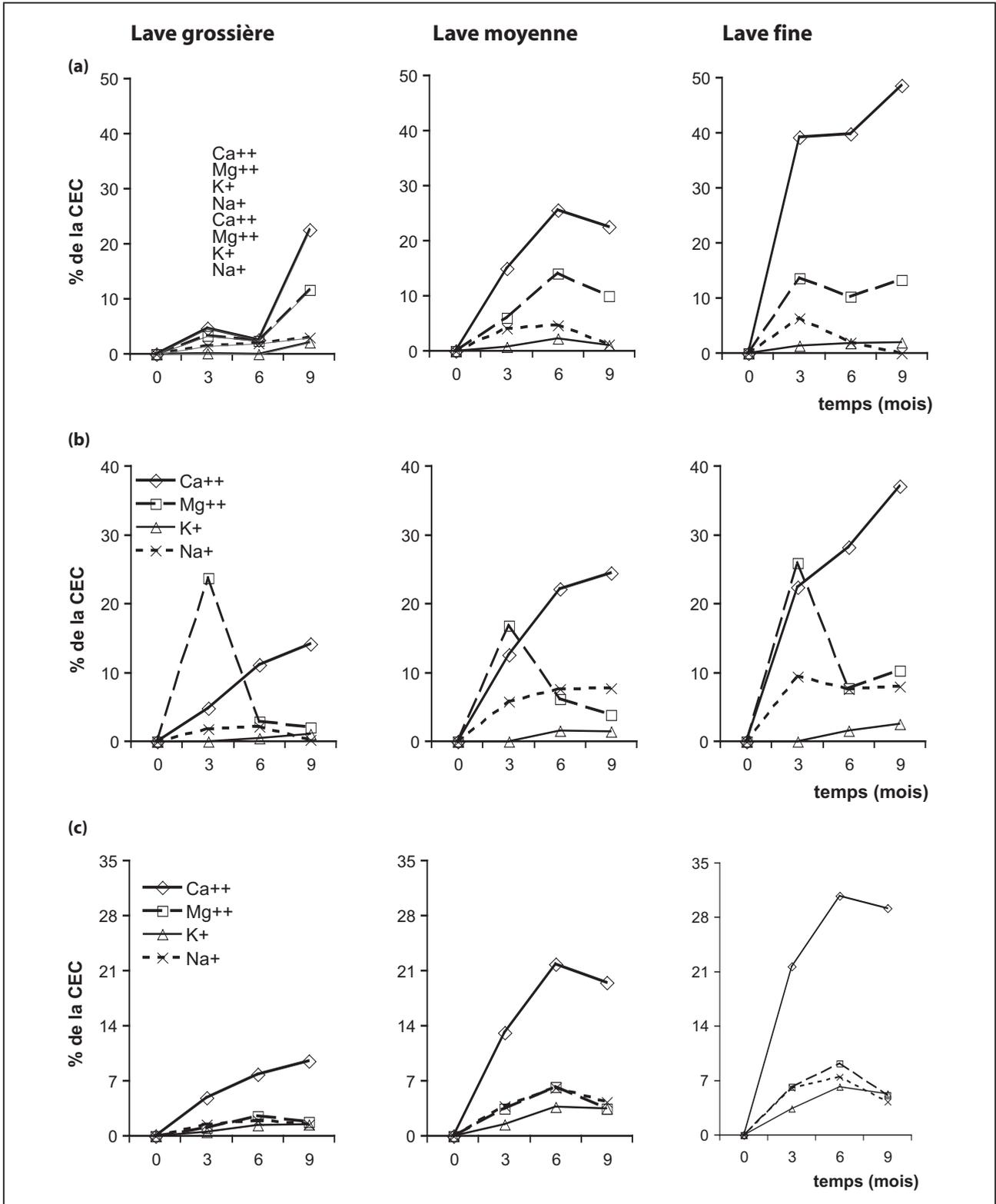


Tableau 5 - Phosphore extrait en $\mu\text{g g}^{-1}$ de sol (ou lave)**Table 5** - Phosphor extraction in $\mu\text{g g}^{-1}$ of soil (or lava)

Echantillon	Doses et finesses	N° extractions				Total
		1	2	3	4	
Ultisol sol n° 4	Blanc	4,16	1,92	3,01	1,64	10,73
	25 G	4,99	3,56	4,92	3,07	16,48
	10 F	5,40	6,29	5,74	3,56	20,99
	25 F	10,79	11,20	12,02	8,74	42,48
	50 F	12,87	15,58	18,58	13,39	60,42
Oxisol sol n° 6	Blanc	0,00	0,55	0,20	0,00	0,83
	25 G	0,00	1,09	0,55	0,82	2,46
	10 F	0,00	1,10	1,09	1,09	3,28
	25 F	3,01	3,28	2,19	2,19	10,67
	50 F	4,37	6,83	3,01	2,73	16,94
Lave	Grossière	255,74	92,90	80,33	66,94	495,91
	Moyenne	272,20	129,03	90,74	77,42	569,39
	Fine	318,03	354,10	209,84	156,84	1038,81

La lave ajoutée aux sols contient 1,3% de P_2O_5 . Lorsqu'on ajoute à un sol une dose de 25 t ha^{-1} de lave, on lui fournit donc près de 325 kg de P_2O_5 , soit l'équivalent d'environ 142 kg de phosphore.

D'après les résultats d'extraction de phosphore pour les différentes doses de lave ajoutées aux sols de Malaisie (sols n° 4 et 6) (tableau 5), une lave de taille fine est capable de fournir deux fois plus de phosphore que celle d'une taille grossière. Pour ce qui concerne les sols du R.D.Congo, on constate qu'une lave fine fournit six fois plus de phosphore qu'une lave grossière à l'Ultisol, et quatre fois plus à l'Oxisol. Ainsi, plus la lave est fine et la dose élevée, plus son action est importante.

Les résultats des expérimentations concernant la fixation du phosphore (tableau 6) révèlent que la lave n'absorbe pas de phosphore ajouté lorsque la concentration de celui-ci est faible (0 à 100 mg l^{-1}). La capacité de fixation du phosphore de l'Oxisol est nettement plus élevée que celle de l'Ultisol, dû au fait que l'Oxisol est plus riche en oxydes d'Al et de fer. D'une manière générale, l'application de la lave entraîne une diminution de la quantité de phosphore adsorbé. L'action de la lave fait donc décroître la forte capacité de fixation du phosphore de ces sols, particulièrement pour les doses supérieures à 25 t ha^{-1} fine. Par ailleurs, la lave provoque une forte augmentation du pH des sols étudiés jusqu'à des valeurs supérieures à pH 5, parfois même

supérieur à 7 (tableaux 2 à 4) et les composants d'Al et de Fe ont été complètement neutralisés. Ceci explique la diminution de la capacité de fixation du phosphore dans ces sols.

CONCLUSION

L'apport de lave trachybasaltique du Nyiragongo broyée finement est capable d'améliorer les différentes propriétés de sols fortement altérés. Son action bénéfique sur l'acidité et les charges de surface de ces sols est due à l'hydrolyse de silicates du verre volcanique et d'autres minéraux facilement altérables qu'elle contient. Ce phénomène provoque la neutralisation de l'acidité d'échange, modifie la force ionique dans la solution du sol, et a un impact positif sur la CEC, et sur l'adsorption de bases échangeables par accroissement des charges permanentes négatives. Elle permet aussi l'accroissement des teneurs en cations basiques (Ca, Mg et K), au-delà du seuil minimal utile pour les plantes. L'apport de lave trachybasaltique broyée a, en outre, amélioré significativement la teneur en phosphore assimilable, utile pour les plantes, par réduction de la rétention forte en cet élément et l'accroissement de sa teneur dans le sol.

La lave fournit une certaine quantité de phosphore au sol. La neutralisation de l'Al échangeable dû à l'augmentation du pH après addi-

Tableau 6 - Phosphore adsorbé en mg kg⁻¹**Table 6** - Adsorbed phosphor in mg kg⁻¹

P ajouté mg kg ⁻¹	P adsorbé en mg kg ⁻¹										
	Lave broyée	OXISOL (sol n° 6)					ULTISOL (sol n° 4)				
		Blanc	25 G	10 F	25 F	50 F	Blanc	25 G	10 F	25 F	50 F
500	26,12	275,86	275,62	240,18	508,10	174,74	139,28	141,82	111,76	136,74	104,88
400	13,12	213,58	231,36	191,84	177,12	156,26	118,00	121,32	95,18	115,82	75,40
300	17,46	176,16	172,44	166,34	139,96	86,46	90,14	106,80	86,68	82,50	66,84
200	1,06	134,28	127,84	120,46	96,24	56,78	66,90	66,66	56,22	62,98	49,42
100	-13,12	72,92	59,72	61,90	43,64	27,92	41,16	41,90	32,24	37,24	17,58
0	-3,20	-2,48	-2,80	-2,40	-3,10	-4,60	0,00	-1,60	-1,20	-1,90	-5,84

tion de la lave au sol, favorise la réduction de la forte capacité du phosphore des sols tropicaux.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement le Conseil Interuniversitaire Flamand pour le support financier. Nos remerciements s'adressent également aux lecteurs critiques dont les remarques constructives nous ont aidé à améliorer ce manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Alva A. K., Sumner M.E. et Miller W.P., 1990 - Reactions of Gypsum or Phosphogypsum in Highly Weathered Acid Subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, pp. 993-998.
- Arias M., Barral M.T., et Diaz-Fieros F., 1995 - Effects of iron and aluminium oxides on the colloidal and surface properties of kaolin. *Clay Clay Miner.*, 43, pp. 406-416.
- Ayres A.S., 1966 - Calcium silicate slag as growth stimulant for sugarcane on low silicon soils. *Soil Sci.*, 101, 3, pp. 216-226.
- Bolt G. M. et Bruggenwert M.G. M., 1976 - Soil chemistry Part A : Basic elements. Elsevier Sc. Publ. Co. Amsterdam.
- Gillman G. P., 1980 - The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of a highly weathered soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, pp. 465-468.
- Gillman G. P., 1981 - Effects of pH and ionic strength on the cation exchange capacity of soils with variable charge. *Aust. J. Soil Res.*, 19, pp. 93-96.
- Gillmann G. P., Burkett D. C. et Coventry R. J., 2001 - A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils ; effect on cation chemistry. *Aust. J. Soil Res.*, 39, pp. 799-811.
- Hingston F.J. et Raupach M., 1967 - The reaction between monosilicic acid and alu-

minium hydroxyde. I : kinetics of adsorption of silicic acid by aluminium hydroxyde. *Aust. J. Soil Res.*, 5, pp. 295-309.

- Joseph K.T., 1977 - Clamatrops - Proceedings of the conference on classification and management of tropical soils, Kuala Lumpur, Malaysia, 15 to 20 August 1977.
- Liang L., Hoffmann A. et Gu B., 2000 - Ligand-induced dissolution and release of ferrihydrite colloids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 12, pp. 2027-2037.
- Noble A. D. et Hurney A. P., 2000 - Long-term effects of lime additions on sugarcane yield and soil chemical properties in north Queensland. *Exp. Agric.*, 36, pp. 397-413.
- Peech M., 1965 - Hydrogen-ion activity. In : Black, C.A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part II. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin*, pp. 914-926.
- Qafoku N. P., Van Ranst E., Noble A. et Baert G., 2004 - Variable charge soils : their mineralogy, chemistry and management. *Adv. Agron.*, 34, pp. 159-215.
- Schroth B. K. et Sposito G., 1997 - Surface charge properties of kaolinite. *Clays and Clay Miner.*, 45, 1, pp. 85-91.
- Sys C., 1983 - The ferralsols of Zaïre. *Proceedings of the fourth International Soil Classification Workshop. Agriculture Edition, 4, Part I*, pp. 76 - 110.
- Uehara G. et Gillman G., 1981 - The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview, Boulder, Colorado, USA.
- Van Lierop W. et Sentran T., 1979 - L'acidité du sol et le besoin en chaux. 2 : le rôle de l'hydrogène, de l'aluminium, du manganèse et du calcium. *Agriculture*, 34, pp. 12-15.
- Van Ranst E., 1995 - Rational soil management in the humid tropics. *Meded. Zitt. K. Acad. Overzeese Wet.*, 40, pp. 209-233.
- Walkley A. et Black I.A., 1965 - *Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy*. pp. 1372 - 1375.
- Wann S. S. et Uehara G., 1978 - Surface charge manipulation of constant surface potential soil colloids : I. Relation to sorbed phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, pp. 565-570.
- Wieland E. et Stumm W., 1992 - Dissolution kinetics of kaolinite in acidic aqueous solutions at 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, pp. 3339-3355.

