

## Rôle des constituants de sols volcaniques et de leurs propriétés de charge dans le fonctionnement de l'agrosystème bananier au Cameroun.

B. DELVAUX\*

PART PLAYED BY THE CONSTITUENTS OF VOLCANIC SOILS AND THEIR CHARGE PROPERTIES IN THE WORKING OF THE BANANA AGROSYSTEM IN CAMEROON.

B. DELVAUX.

*Fruits*, Jun. 1989, vol. 44, n° 6, p. 309-319.

**ABSTRACT** - In Cameroon, the banana crops for export are mainly grown on soils derived from basalt pyroclasts. Depending on the age of the parent material, the soils differ according to the following time sequence : andosols → brown soils → ferrallitic soils. The high calcium-magnesium reserves in the andosols and the low rate at which potassium is retained by the organic and allophanic colloids account for the potassium deficiencies frequently observed on banana plants. In the brown soils, with predominantly hydrated halloysite, the state of the calcium-magnesium reserves and highly selective adsorption of potassium produce a balanced cation make-up. The low magnesium reserves in the ferrallitic soils together with their acidity and high aluminium saturation mean that potassium is retained selectively compared with the bivalent Ca, Mg cations, which is the cause of the «magnesium blue» frequently observed on banana plants in these soils. These results show that by drawing up a detailed description of the soils and studying their ion exchange properties, their behaviour in a cropping system can be accounted for, and even forecast.

ROLE DES CONSTITUANTS DE SOLS VOLCANIQUES ET DE LEURS PROPRIETES DE CHARGE DANS LE FONCTIONNEMENT DE L'AGROSYSTEME BANANIER AU CAMEROON.

B. DELVAUX.

*Fruits*, Jun. 1989, vol. 44, n° 6, p. 309-319.

**RESUME** - Au Cameroun, la culture bananière d'exportation est principalement pratiquée sur des sols dérivés de pyroclastes basaltiques. En fonction de l'âge du matériau parental, les sols se différencient selon la chronoséquence andosols → sols brunifiés → sols ferrallitiques. Les réserves calco-magnésiennes élevées des andosols et la faible rétention du potassium par les colloïdes organiques et allophaniques y expliquent l'observation fréquente de carences potassiques sur bananiers. Dans les sols brunifiés, dominés par l'halloysite hydratée, l'état des réserves calco-magnésiennes et une adsorption hautement sélective du potassium sont à l'origine d'une garniture cationique équilibrée. Les faibles réserves magnésiennes des sols ferrallitiques, leur acidité et leur saturation aluminique élevée favorisent la rétention sélective du potassium par rapport aux cations divalents Ca, Mg, à l'origine du bleu magnésien, fréquemment observé sur bananiers dans ces sols. Ces résultats montrent qu'une caractérisation détaillée des sols et l'étude de leurs propriétés d'échange ionique permettent d'expliquer leur comportement dans un système cultivé, voire de le prédire.

### INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Au Cameroun, la culture bananière d'exportation est exclusivement pratiquée dans deux régions géographiques distinctes : (a) les basses pentes sud-est du Mont Cameroun (4°09'4"13"N, 9°16'9"21"E ; alt. 300-600 m) et la plaine de Tiko (4°05'N, 9°19'9"21"E ; alt. 50-60 m) et (b) la plaine du Mungo (4°30'4"53"N, 9°37'9"57"E ; alt. 45-520 m). Le climat de ces régions est équatorial à deux saisons : ses principales caractéristiques ont été récemment

résumées (10). Sur les basses pentes est du Mont Cameroun et dans la plaine du Mungo, les sols dérivent de matériaux pyroclastiques basaltiques d'époque quaternaire (30). Les dépôts volcaniques étant d'âge différent, la distribution spatiale des sols répond à une chronoséquence andosols → sols brunifiés → sols ferrallitiques (30). Par voie d'enquête diagnostic, nous avons pu esquisser les incidences de la variabilité pédologique et de l'itinéraire technique sur les potentialités de la culture bananière dans ces régions (12). Entre autres facteurs, les relations entre le sol et la plante, principalement sous l'angle nutritionnel, sont discriminantes dans l'analyse du potentiel de production et peuvent être illustrées schématiquement à la figure 1.

(\* ) - IRFA/CIRAD, B.P. 153 - 97202 FORT DE FRANCE CEDEX

Cet article résume une partie des résultats présentés dans la thèse de l'auteur.

TABLEAU 1 - Caractéristiques générales des matériaux étudiés.

Profil	Classification (*)	Horizon (prof. cm)	C p. 100	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (1:2.5)	Argile p. 100	ECEC me/100 g sol	Al+H me/100 g sol
MO	andosol désaturé humique	A (12-27)	3.36	4.9	-	10.27	0.85
		B (51-91)	1.78	5.5	35.0	4.89	0.24
MB	andosol saturé peu développé	A (00-12)	3.90	6.3	-	20.88	0.0
		B (12-35)	3.78	5.9	38.4	11.49	0.0
LO	andosol saturé humique	A (08-30)	5.83	5.8	-	19.38	0.14
		B (47-73)	3.55	6.6	52.3	17.63	0.0
DJ	sol brun eutrophe	A (00-17)	2.81	5.5	-	19.31	0.22
		B (40-84)	0.65	5.8	74.6	10.58	0.0
NY	sol brun lessivé	A (08-17)	1.94	5.4	-	10.53	0.41
		B (30-63)	0.46	5.4	82.1	9.97	0.33
IR	sol brun lessivé	A (00-20)	1.85	5.1	-	13.89	0.55
		B (50-90)	0.44	6.1	71.0	13.75	0.0
MU	intergradesol brun- sol ferrallitique	A (00-10)	1.81	3.8	-	6.21	4.70
		B (55-77)	0.61	4.9	81.4	5.74	2.05
MK	sol ferrallitique	A (00-11)	2.16	4.5	-	7.09	4.41
		B (68-99)	0.60	4.8	95.4	7.26	3.07

\* - C.P.C.S. (1967).

effective (ECEC), une augmentation de la teneur en argile et de l'acidité d'échange, l'aluminium devenant le cation dominant dans les sols ferrallitiques MU, MK. Cette évolution est parallèle au degré d'altération des sols et à la séquence minéralogique suivante, en termes de minéraux secondaires dominants (10) :

andosols → sols brunifiés → sols ferrallitiques  
allophane → halloysite → kaolinite

#### Réserves minérales.

Le degré d'altération des sols peut être apprécié par les teneurs totales en cations basiques (20), rapportées dans le tableau 2. La réserve totale en bases (TRB) diminue des andosols vers les sols plus évolués, pour atteindre des valeurs caractéristiques du domaine de l'altération ferrallitique [TRB < 40 me/100 g sol (20)]. Quel que soit le type de sol, le magnésium est le cation dominant. Il est connu que les roches-mères pyroclastiques quaternaires des régions étudiées

TABLEAU 2 - Teneurs totales en cations basiques, réserve totale en bases (TRB) et proportion relative du potassium.

Profil	Horizon	Ca	Mg	K	Na	TRB	K p. 100
MO	A	185.6	264.8	13.3	20.4	484.1	2.7
	B	218.6	320.9	13.5	26.9	579.9	2.3
MB	A	115.8	204.1	6.6	17.8	344.3	1.9
	B	124.7	213.0	5.3	21.7	364.7	1.4
LO	A	75.8	167.1	4.9	16.5	264.3	1.8
	B	75.8	260.8	3.8	15.6	365.0	1.1
DJ	A	28.3	164.6	13.3	4.3	210.5	6.3
	B	11.9	171.2	5.6	1.3	190.0	2.9
NY	A	11.9	36.2	8.3	4.7	61.1	13.5
	B	6.4	26.3	9.9	4.7	47.3	20.9
IR	A	44.9	101.2	16.8	17.4	180.3	9.3
	B	13.9	39.5	7.8	4.3	65.5	11.5
MU	A	4.4	47.7	5.1	2.6	59.8	8.5
	B	3.6	36.1	4.1	0.9	44.7	9.1
MK	A	2.9	21.3	4.1	1.3	29.6	13.8
	B	5.2	23.8	4.5	1.3	34.8	12.9

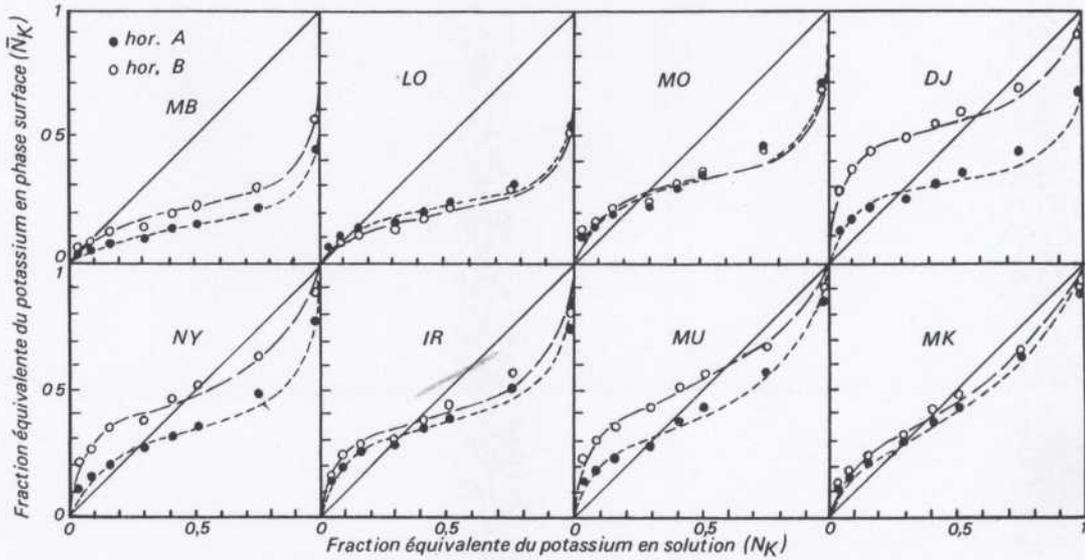


FIGURE 3 - Isothermes d'échange Ca-K réalisées à pH 4 et à une concentration totale de la solution d'équilibre 0,01 N.

sont riches en plagioclases calciques et en minéraux ferromagnésiens (augite, olivine) et très pauvres en minéraux primaires potassiques (15, 30). Dès lors, il n'est pas surprenant d'observer, dans les sols les plus récents (andosols), de hautes teneurs totales en Ca et Mg (tableau 2). Dans ces matériaux jeunes, la proportion relative du potassium total est particulièrement faible et même inférieure à celle du sodium ; elle augmente cependant dans les sols plus évolués.

Si l'on se réfère aux figures 1 et 2, on peut observer

que dans les sols récents (andosols), l'altération des minéraux primaires induit un enrichissement en Ca et Mg de la solution du sol et des sites d'échange, contribuant par là au déficit potassique naturel de ces sols et donc à l'expression fréquente de carences en potassium (12). Dans les autres types de sols, la faiblesse des réserves potassiques signifie qu'une alimentation en K régulière (sols brunifiés) et parfois excédentaire (sols ferrallitiques) implique un comportement particulier du complexe d'échange, susceptible de stocker de manière non négligeable cet élément nutritif (cf. figure 2).

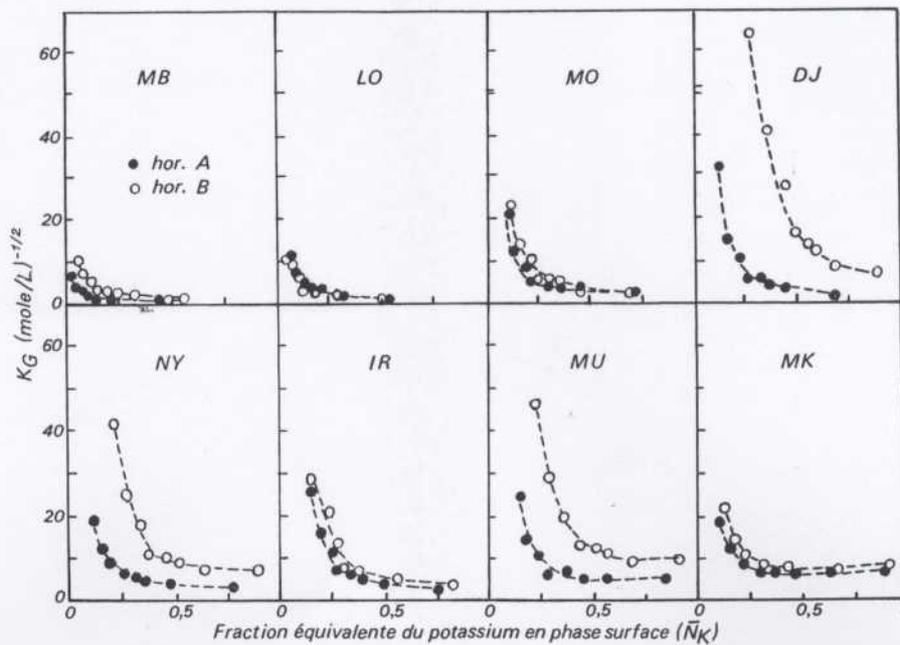


FIGURE 4 - Variation du coefficient de sélectivité de Gapon  $K_G$  en fonction de la fraction équivalente du potassium en phase adsorbée  $\bar{N}_K$ .

### Comportement d'échange.

- Equilibres réalisés à pH ~ 4.

Le pH de la solution d'équilibre varie très peu et est de l'ordre de 4-4,2 pour tous les échantillons étudiés. Ces faibles valeurs de pH sont probablement liées à la présence de gibbsite et de minéraux de type kaolinitique identifiés dans les matériaux étudiés (10). Les courbes isothermes, obtenues à pH 4, sont présentées à la figure 3. La figure 4 illustre la variation du coefficient de sélectivité de Gapon ( $K_G$ ) en fonction de la fraction équivalente du potassium en phase surface ( $\bar{N}_K$ ). Les courbes isothermes (figure 3) montrent généralement une affinité supérieure pour l'ion K dans les horizons B relativement aux horizons de surface (A), ceci étant lié à la préférence marquée des sites organiques pour les ions Ca (28).

Les propriétés d'échange ionique Ca-K varient manifestement en fonction du degré d'altération des sols. Les andosols saturés (MB, LO) montrent une sélectivité potassique faible, indiquant une affinité d'échange élevée de leurs constituants (allophane, matière organique) pour les ions Ca. On observe une augmentation de la sélectivité potassique dans l'andosol désaturé MO. L'adsorption sélective du potassium devient maximale dans le sol brun eutrophe DJ et diminue ensuite dans les sols bruns lessivés NY, IR et ferrallitiques MU, MK.

La figure 4 visualise clairement l'évolution de la sélectivité potassique de l'échangeur et de la proportion des sites d'adsorption spécifique du potassium en fonction du degré d'altération des sols. Dans les andosols saturés (MB, LO), une faible fraction de la CEC (~ 10 p. 100) manifeste une certaine sélectivité pour l'ion K ( $K_G \sim 10$ ), avec une valeur

du coefficient  $K_G$  similaire à celle mesurée ailleurs sur d'autres andosols (29). Dans le sol brun eutrophe (DJ), l'halloysite hydratée domine le complexe d'échange : on observe, particulièrement dans l'horizon B, qu'une proportion élevée de la CEC (~ 50 p. 100) montre une adsorption hautement sélective du potassium ( $K_G > 60$ ). La proportion des sites spécifiques de l'ion K, de même que la valeur du coefficient de sélectivité  $K_G$  aux faibles concentrations en K de la solution d'équilibre, diminuent ensuite dans les sols plus évolués (figure 4).

L'isotherme d'échange Ca-K (figure 3) et les valeurs du coefficient de sélectivité  $K_G$  (figure 4) ne donnent cependant qu'une image qualitative du comportement de l'échangeur. D'un point de vue agronomique, il apparaît important (a) de chiffrer le nombre de sites spécifiques pour l'ion K, et (b) de décrire la variation de la teneur en K échangeable en fonction de sa concentration relative dans la solution du sol (relation Q-1). Le nombre de sites spécifiques pour l'ion K peut être estimé quantitativement à partir de la modélisation à deux sites de la courbe isotherme (13) : son évolution schématisée en fonction du degré d'altération des sols est illustrée à la figure 5. Ce graphique montre une variation parallèle du nombre de sites spécifiques du potassium dans les horizons A et B. L'examen simultané de cette figure, du tableau 2 et de la figure 1 suggère que les équilibres cationiques dans les sols étudiés dépendent étroitement de l'importance des réserves calco-magnésiennes et du comportement du complexe d'échange vis-à-vis du potassium. Dans les andosols étudiés, les réserves élevées en Ca, Mg et une faible adsorption spécifique du potassium favorisent la lixiviation de ce cation, particulièrement en saison pluvieuse, et, par conséquent, limitent l'absorption de ce cation par la plante (cf. figures 1 et 2). Dans le cas du sol MO, représentatif d'une zone à fortes carences potassiques

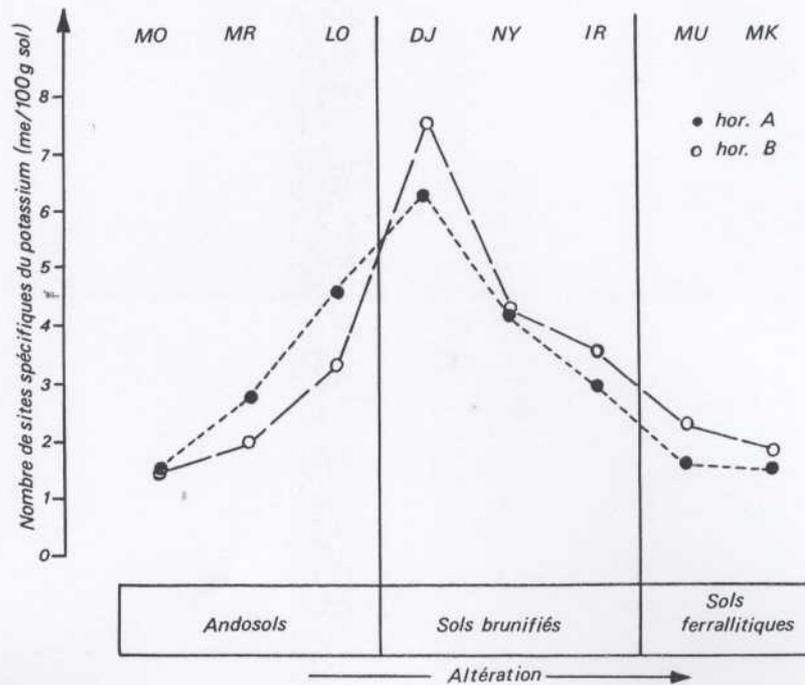


FIGURE 5 - Schéma de variation du nombre de sites spécifiques de l'ion K dans les horizons A et B en fonction du degré d'altération des sols étudiés.

(Molyko), il est intéressant de constater que la valeur du nombre de sites spécifiques de l'ion K est sensiblement égale au niveau critique de carence potassique défini à partir des résultats de l'enquête diagnostique, c'est-à-dire 1,5 me/100 g sol (12). Dans les sols brunifiés, les garnitures cationiques équilibrées s'expliquent par des réserves calco-magnésiennes moindres et une adsorption sélective du potassium par le complexe d'échange. Au stade de l'altération ferrallitique, la capacité de stockage du potassium est réduite (figure 5), mais les valeurs moindres de l'ECEC et les très faibles réserves calco-magnésiennes peuvent contribuer au déséquilibre K/Mg. Cette interprétation est suggérée par la figure 6 qui compare la relation Q-I (figure 6a) et la relation de Gapon (figure 6b) pour des sols dont le comportement agronomique diffère.

● Application de la relation Q-I et de l'équation de Gapon aux équilibres Ca-K à pH 4.

La relation Q-I (2) est très souvent utilisée pour caractériser le pouvoir tampon d'un sol vis-à-vis du potassium. Elle rend compte du fait que la nutrition potassique de la plante dépend de deux facteurs : la quantité (Q) de potassium potentiellement disponible (K échangeable) et l'intensité (I) avec laquelle il est retenu sur les sites d'échange, évaluée par le rapport d'activité ionique dans la solution d'équilibre, KAR. La relation de Gapon s'exprime selon l'équation (1).

Les deux relations sont illustrées à la figure 6, à partir des résultats des équilibres d'échange réalisés à pH 4 (figure 3), pour les situations suivantes :

MO : andosol désaturé, carences potassiques sévères ;  
 MB : andosol saturé, carences potassiques occasionnelles ;  
 MK : sol ferrallitique, bleu magnésien fréquent ;  
 DJ : sol brun eutrophe, nutrition adéquate.

La relation Q-I (figure 6a) met en évidence trois types de comportement, vis-à-vis de l'ion K :

- un pouvoir tampon très faible dans l'horizon A de l'andosol MO ;
- un pouvoir tampon intermédiaire dans les horizons A de l'andosol MB et du sol ferrallitique MK ;
- un pouvoir tampon élevé dans les horizons A et B du sol brun eutrophe DJ.

Ces courbes permettent d'expliquer la fréquence élevée des carences potassiques dans les andosols de type MO, très peu tamponnés vis-à-vis du potassium, et une alimentation régulière en potassium dans les sols brunifiés, à pouvoir tampon élevé, le potassium pouvant être « stocké » sur les sites d'échange. Par contre, les courbes Q-I relatives aux échantillons MK-A et MB-A sont pratiquement confondues alors que ces deux matériaux représentent des situations nutritionnelles très différentes (voir plus haut). Ceci est lié au fait que la relation Q-I intègre à la fois les notions de CEC et de sélectivité d'échange.

La relation de Gapon, illustrée à la figure 6b, montre un comportement nettement distinct des échantillons MB-A et MK-A, soulignant l'importance de la sélectivité d'échange des matériaux dans l'établissement des équilibres relatifs entre cations sur le complexe d'échange, particuliè-

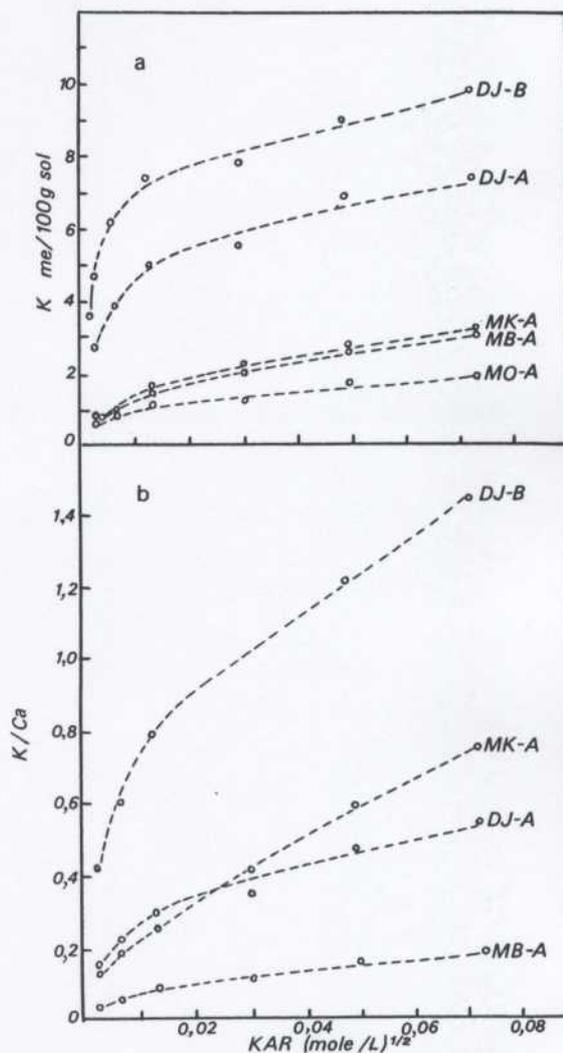


FIGURE 6 - Variation de la teneur en K échangeable (a) et du rapport des ions adsorbés K/Ca (b) en fonction du rapport d'activité ionique en solution KAR, pour les équilibres d'échange Ca-K réalisés à pH 4.

en haut (6a) : relation Q-I ;  
 en bas (6b) : application de la loi de Gapon.

rement dans des conditions climatiques favorisant la lixiviation. Dans l'horizon A du profil MB, on observe en effet que toute augmentation de la concentration relative en K dans la solution du sol (par exemple suite à un apport) n'induit qu'un très faible accroissement du rapport K/Ca sur le complexe d'échange. Ceci explique : (a) l'observation occasionnelle de carences potassiques dans les parcelles cultivées représentées par ce profil, et (b) la nécessité des apports potassiques pour y atteindre de hauts niveaux de potentiel (10, 11). Il est par ailleurs intéressant de constater que la gamme des valeurs du rapport K/Ca (0,05-0,15 pour MB-A, figure 6b) est bien du même ordre de grandeur que celle rencontrée dans les parcelles où la fréquence de

la carence potassique est élevée (11). Dans l'horizon A du profil MK, représentatif d'une zone à forte fréquence d'observation du bleu magnésien, la sélectivité potassique de l'échangeur est supérieure à celle mesurée dans l'horizon A du sol brun eutrophe DJ, dans le domaine des concentrations relatives en K plus élevées ( $KAR > 0,03$ , figure 6b), concentrations qui peuvent être atteintes par exemple après un apport.

Les rapports K/Mg élevés observés sur le complexe d'échange de ces sols peuvent donc être liés à la conjonction des facteurs suivants : (a) la sélectivité potassique du complexe adsorbant sur une large gamme de concentrations de la solution du sol (figure 6b), (b) une compétition des ions Mg, Ca, Al pour la saturation des sites moins spécifiques du potassium, favorisant la saturation aluminique de ces sites et, par là, l'existence de rapports  $K/(Ca + Mg)$  ou  $K/Mg$  élevés. Cette hypothèse a été vérifiée en caractérisant la sélectivité d'échange des horizons A et B des sols ferrallitiques à divers taux de saturation en Al échangeable (10).

- Incidence de la saturation aluminique sur la sélectivité potassique des sols ferrallitiques à  $pH \sim 4$ .

L'isotherme d'échange Ca-K (figure 3), la courbe Q-I et la relation de Gapon (figure 6) sont obtenues à partir de l'équilibre réalisé à  $pH 4$ , et à une concentration totale  $0,01 N$ . Dans ces conditions de faible concentration, nous avons montré que seule une fraction de l'Al échangeable est désorbée dans le cas des sols acides et qu'une proportion donnée des sites d'échange, relativement constante pour les points d'équilibre, demeure saturée par l'aluminium échangeable (10). La concentration de ce cation dans la solution d'équilibre étant de l'ordre de  $10^{-6} M$ , l'aluminium n'intervient pas dans l'échange Ca-K et son effet s'assimile à une réduction du nombre de sites disponibles pour l'échange Ca-K sensu stricto.

Afin de préciser la sélectivité d'échange Ca-K de ces sites «aluminiques» et l'effet de la saturation en Al sur la sélectivité potassique, un point de l'équilibre Ca-K ( $KAR = 0,02$ ) a été obtenu (a) à  $pH 4$  et normalité totale  $10^{-2} N$ , après désorption complète de l'Al échangeable par des solutions mixtes plus concentrées, (b) à  $pH 4$  et normalité totale  $10^{-2} N$ , sans désorption préalable de l'Al (cf figure 3), et (c) à  $pH 4$  et normalité totale de l'ordre de  $0,5 \cdot 10^{-3} N$ , obtenue après une mise à l'équilibre sol-eau selon un mode opératoire décrit par ailleurs (14). Dans ce dernier cas, l'échange fait intervenir les ions K, Ca et Mg ; les concentrations en Al dans la solution sont de l'ordre de  $10^{-6} M$ .

Le tableau 3 montre l'évolution du rapport K/Ca (a, b), ou  $K/(Ca + Mg)$  (c) en fonction de la saturation aluminique des sites d'échange pour une valeur fixée de  $KAR = 0,02$  (mole/L)<sup>1/2</sup>, dans le cas de l'échantillon MK-A. Ce tableau met en évidence une augmentation du rapport K/Ca ou  $K/(Ca + Mg)$  lorsque la saturation aluminique croît. Ces résultats, confirmés sur d'autres sols acides de la séquence étudiée (10), révèlent une compétition des ions Al, Ca, Mg pour les sites d'échange présentant une spécificité moindre pour le potassium. Etant donné la préférence de ces sites pour l'Al [tableau 3, voir aussi (6, 7, 25)], leur saturation croissante par ce cation accentuera l'excès relatif du potassium relativement aux cations divalents Ca et Mg.

De ce point de vue, l'acidité des sols ferrallitiques et leur saturation aluminique élevée apparaissent comme des facteurs favorables aux excès relatifs du potassium par rapport au magnésium et à l'apparition du bleu magnésien sur bananier. Ce résultat rejoint des observations anciennes (23, 24).

- Equilibres Ca-K réalisés à  $pH 5,8$ .

L'enquête diagnostic a montré que le  $pH$  (sol/eau : 1/2,5) des horizons de surface variait de 4 à 6 (12). Il apparaît donc important de préciser le comportement d'échange des sols à des valeurs de  $pH$  plus élevées. Après désorption complète de l'aluminium échangeable par des solutions mixtes  $KCl-CaCl_2 1 N$ , l'équilibre Ca-K a été réalisé à  $pH 5,8$  et à une concentration totale  $0,01 N$ . Le  $pH$  de la solution d'équilibre est tamponné à l'aide de triéthanolamine (29).

Les résultats sont présentés au tableau 4 et mettent en évidence une augmentation (variable mais souvent importante) de la CEC avec le  $pH$ . Parallèlement, on observe une diminution systématique de la sélectivité d'échange pour l'ion K, évaluée de façon conventionnelle par la valeur du coefficient  $K_G$  mesurée pour une solution de fraction équivalente en potassium  $N_K = 0,04$  ( $K_G, 0,04$ ).

L'augmentation de la CEC avec le  $pH$  est un phénomène connu dans les sols à charge mixte, c'est-à-dire à la fois permanente et variable. La réduction de la sélectivité potassique suite à l'accroissement du  $pH$  et de la CEC signifie que les sites d'échange à charge variable, induits par l'augmentation du  $pH$ , présentent une affinité élevée pour le calcium. L'augmentation de la densité superficielle de charge favorise en effet l'adsorption du cation de valence plus élevée (1).

TABLEAU 3 - Evolution du rapport K/Ca ou  $K/(Ca + Mg)$  en fonction de la saturation aluminique du complexe adsorbant de l'horizon A du sol ferrallitique MK [ $KAR = 0,02$  (mole/L)<sup>1/2</sup>]

	Al/ECEC	K/CA(a,b) ou $K/(Ca + Mg)$ (c)	ECEC (c) ou (K + Ca + Al) (a,b) me/100 g sol
(a)	0.0	0.26	9.05
(b)	0.19	0.32	9.16
(c)	0.52	0.84	7.10

(a) Equilibre Ca-K réalisé après désorption de l'Al échangeable ( $pH 4$ ,  $0,01 N$ )

(b) Equilibre Ca-K réalisé sans traitement de désorption ( $pH 4$ ,  $0,01 N$ )

(c) Equilibre sol-eau ( $pH 4$ ,  $\sim 0,001 N$ )

TABLEAU 4 - Variation de la charge (somme des espèces ioniques adsorbées) et de la sélectivité potassique en fonction du pH de la solution d'équilibre. La sélectivité potassique est évaluée par la valeur du coefficient  $K_G$  mesurée pour la solution d'équilibre de fraction ionique  $N_K = 0.04$ .

Echantillon	Equilibre à pH 4		Equilibre à pH 5.8	
	(K + Ca + Al) me/100 g	$K_{G,0.04}$ (mole/L) <sup>-1/2</sup>	(K + Ca) me/100 g	$K_{G,0.04}$ (mole/L) <sup>-1/2</sup>
MB	A	20.8	21.6	5.0
	B	10.7	13.2	7.2
MO	A	6.9	12.4	6.9
	B	5.3	8.6	12.2
DJ	A	21.8	23.1	20.8
	B	16.5	19.0	46.0
IR	A	14.3	17.1	19.8
	B	14.0	14.6	23.6
MU	A	6.6	10.3	13.7
	B	6.8	9.2	35.3
MK	A	9.2	13.1	11.4
	B	8.6	11.1	16.5

Ces résultats montrent qu'une augmentation importante du pH dans les andosols (ou dans les sols récents à charge variable) favorisera la rétention des cations divalents Ca, Mg relativement au potassium avec un risque de déséquilibre cationique pouvant induire la carence potassique. Dans les sols ferrallitiques par contre, l'augmentation du pH permettra (a) de diminuer le taux de saturation aluminique, (b) d'augmenter la CEC en favorisant la rétention des cations divalents Ca, Mg relativement au potassium et, à terme, une réduction du déséquilibre K/Mg (bleu magnésien). Une augmentation excessive du pH dans ces sols pourrait par ailleurs induire un déficit potassique, en raison de la capacité de stockage réduite de ces sols pour l'ion K (cf figures 5 et 6b). A l'inverse, la diminution du pH favorisera l'excès relatif du potassium par rapport au magnésium, par le biais d'une rétention moindre des ions divalents Ca, Mg.

Ces observations montrent que l'intérêt du chaulage en bananeraie dépend davantage du type de sol que de la valeur intrinsèque du pH. Elles soulignent par ailleurs l'importance de la connaissance des propriétés de charge et de leurs relations avec le pH, comme préalable à une programmation raisonnée de la fumure et des amendements.

#### Relations propriétés de charge-constituants des sols.

La variation de la sélectivité potassique du complexe d'échange en fonction du stade évolutif des sols étudiés montre qu'il existe des relations très étroites entre la nature des constituants du complexe adsorbant, leur importance quantitative et leurs propriétés de charge.

Dans les andosols étudiés, le complexe d'échange est dominé par les colloïdes organiques et allophaniques. La faible affinité de la matière organique pour les ions K et  $NH_4$  relativement aux cations divalents est connue depuis longtemps (28). L'adsorption sélective du potassium par les allophanes présents dans les andosols étudiés est très réduite (10) : leur affinité élevée pour les ions Ca rejoint des observations antérieures (32).

Dans les sols brunifiés et ferrallitiques de la séquence

étudiée, l'importance de l'adsorption sélective du potassium est associée à la présence d'hallowysite hydratée qui est le minéral argileux dominant dans le complexe d'altération des sols brunifiés. La sélectivité potassique diminue ensuite dans les matériaux plus évolués, où la kaolinite domine progressivement le complexe d'échange.

Une telle évolution de la sélectivité d'échange Ca-K en fonction du stade évolutif des sols a été vérifiée sur une séquence similaire en Martinique, sol peu évolué → andosol → «sol brun rouille à hallowysite» → «ferrisol» (16), les «sols brun rouille à hallowysite» manifestant également une adsorption hautement sélective du potassium. Ces résultats ont par ailleurs permis d'expliquer la dynamique des éléments fertilisants au champ (17) et de développer un outil analytique permettant une application de l'avertissement climatique de la fertilisation tel que proposé antérieurement (18).

Dans deux régions géographiques distinctes, une relation étroite apparaît donc entre la sélectivité potassique de l'échangeur et l'importance quantitative de l'hallowysite hydratée dans le complexe d'altération, comme le montre la figure 7. Cette relation est paradoxale car il est classiquement admis que l'hallowysite ne possède pas de charge inhérente, et a fortiori de sites cristallographiques à haute spécificité potassique, comme dans plusieurs minéraux 2:1. Les propriétés de charge de l'hallowysite hydratée font cependant l'objet d'une controverse actuelle et certains auteurs admettent l'existence d'une charge permanente dans ce minéral (33) de même que celle de sites spécifiques pour l'ion  $NH_4$  (26).

Plusieurs techniques ont permis une caractérisation détaillée de la fraction argileuse des sols brunifiés et ferrallitiques étudiés (10). Les résultats convergent pour montrer que la relation existant entre l'hallowysite hydratée et l'adsorption sélective du potassium n'est pas fortuite : elle est liée à l'interstratification des feuilletts hallowysitiques avec des smectites dont la composition est caractéristique de la série beidellite ferrifère - nontronite (10). Il apparaît en outre que la diminution de la sélectivité d'échange du stade sol brunifié au stade ferrallitique semble liée à la décroissance

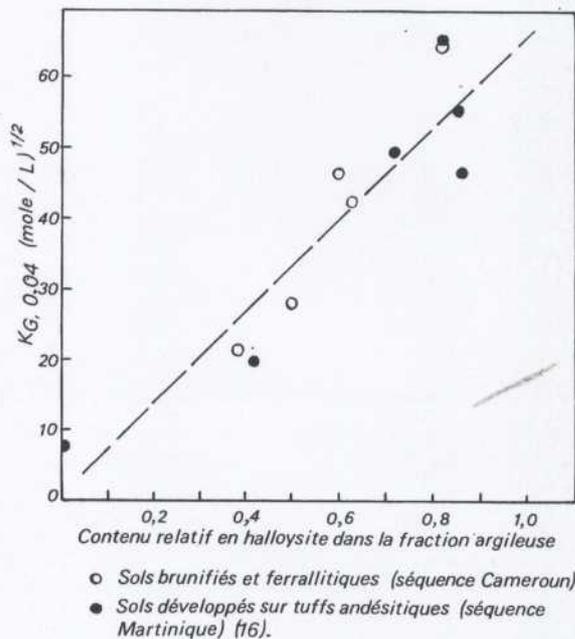


FIGURE 7 - Relation entre le contenu relatif en halloysite H/(H+K) dans la fraction argileuse ( $< 2 \mu\text{m}$ ) des horizons B et leur sélectivité potassique, évaluée par la valeur du coefficient de Gapon  $K_G$  calculée pour une solution de fraction équivalente en K égale à 0.04 ( $K_G, 0.04$ ).

de la densité de charge des feuillets smectitiques avec le degré d'altération des sols (10). Les propriétés de charge des sols à halloysite étudiés ne sont donc pas le fait de l'halloysite elle-même, mais de son association étroite avec des smectites ferrifères chargées.

### CONCLUSION

Les sols affectés à la culture bananière d'exportation au Cameroun dérivent, pour la plupart, de matériaux pyro-

clastiques basaltiques d'époque quaternaire. Ils diffèrent en fonction de leur degré d'altération, la nature de leurs constituants et leurs propriétés de charge. Ces différences sont à l'origine des variations de leur fertilité et de leur comportement dans l'agrosystème bananier camerounais : dans les conditions écologiques de ce système, l'état d'altération des sols et leurs propriétés d'échange ionique influencent en effet directement les équilibres relatifs entre cations et l'absorption de ces éléments par la plante.

Dans les andosols étudiés, les réserves élevées en Ca, Mg et l'adsorption réduite du potassium par les constituants organiques et allophaniques du complexe d'échange favorisent la lixiviation de l'ion K, une alimentation calcique excédentaire et l'expression de la carence potassique par la plante. Des valeurs de pH élevées sont susceptibles d'aggraver ce déséquilibre, en favorisant l'adsorption sélective des cations divalents sur le complexe d'échange.

Le complexe d'altération des sols brunifiés étudiés est dominé par l'halloysite contaminée par des smectites de haute charge. La présence de ces minéraux est responsable d'une adsorption hautement sélective de l'ion K par le complexe adsorbant. L'importance relative des réserves calco-magnésiennes de ces sols et leur capacité de stockage pour l'ion K sont à l'origine d'une nutrition cationique adéquate.

L'adsorption sélective du potassium dans les sols ferrallitiques, dont le complexe d'altération est dominé par la kaolinite, est favorisée, relativement aux cations divalents Ca et Mg, par l'acidité de ces sols et leur saturation aluminique élevée. Il en résulte un excès relatif du potassium par rapport au magnésium qui, aggravé par des réserves magnésiennes faibles, est directement à l'origine du bleu magnésien.

Ces résultats soulignent l'intérêt d'une caractérisation détaillée des sols et de l'étude de leurs propriétés de surface dans le diagnostic de la fertilité du système cultural considéré. Ces propriétés, dont l'objet d'étude est l'interface solide-solution, sont susceptibles d'influencer non seulement le comportement des éléments fertilisants, mais aussi celui des pesticides (19) et, par ailleurs, le «fonctionnement» biologique des sols, par le biais des interactions existant entre les micro-organismes et les surfaces adsorbantes (22).

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ARNOLD (P.W.). 1978. Surface-electrolyte interactions. in *The chemistry of soil constituents*, D.J. Greenland and M.H.B. Hayes (editors) John Wiley and Sons, 355-404.
2. BECKET (Ph.). 1964. The «immediate» Q-I relations of labile potassium in the soil. *J. Soil. Sci.*, 15, 9-23.
3. BLACK (C.A.), EVANS (D.D.), WHITE (J.L.), ENSMINGER (L.E.) and CLARCK (F.E.). 1965. Methods of soil analysis part 2. *America Society of Agronomy, Madison, Wisconsin*.
4. BOLT (J.M.). 1979. Soil chemistry B. Physico-chemical models. *Developments in soil science vol. 5B Elsevier*, 479 p.
5. CHAMPION (J.). 1963. Le bananier. *Ed. Maisonneuve et Larose, Paris*, 263 p.
6. COULTER (B.S.). 1969. The equilibria of K:Al exchange in clay minerals and acid soils. *J. Soil. Sci.*, 20, 72-83.
7. COULTER (B.S.) and TALIBUDEEN (O.). 1968. Calcium/aluminium exchange equilibria in clay minerals and acid soils. *J. Soil Sci.*, 19, 237-250.
8. C.P.C.S. 1967. Classification des sols. *Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols*, 96 p.
9. DAVIES (C.W.). 1962. Ion association. *Butterworths, London*.
10. DELVAUX (B.). 1988. Constituants et propriétés de surface de sols dérivés de pyroclastes basaltiques du Cameroun occidental. Approche génétique de leur fertilité. *Thèse, Unité de Chimie des Interfaces, U.C.L. (Louvain)*, 335 p.

11. DELVAUX (B.) et LASSOUDIÈRE (A.). 1984.  
Etude agrépédologique de la zone bananière camerounaise :  
Enquête Diagnostic.  
*IRA, Ekona, Cameroun*, 240 p.
12. DELVAUX (B.), LASSOUDIÈRE (A.), PERRIER (X.) et  
MARCHAL (J.). 1986.  
Une méthodologie d'étude des relations sol-plante-techniques  
culturales par enquête diagnostic. Application à la culture  
bananière camerounaise. Synthèse des résultats.  
*Fruits*, 41 (6), 359-370.
13. DUFEY (J.E.) and DELVAUX (B.). 1989.  
Modeling potassium-calcium exchange isotherms in soils.  
*sous presse (Soil Sci. Soc. Amer. J.)*.
14. DUFEY (J.E.) and MAROT (J.M.). 1987.  
Single empirical relationship for potassium exchange equilibria  
in various soils.  
*Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 51, 918-920.
15. DUMORT (J.C.). 1968.  
Notice explicative sur la feuille Douala ouest. Carte géologique  
de reconnaissance au 1/500.000.  
*BRGM, Direction des Mines et de la Géologie, Yaoundé, Cameroun*.
16. FONTAINE (Sylvie) et DELVAUX (B.). 1989.  
Propriétés d'échange ionique de sols volcaniques de la Martinique.  
Application à la programmation de la fumure potassique.  
*Fruits*, 44 (3), 123-133.
17. GODEFROY (J.) et DORMOY (Micheline). 1983.  
Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans les sols de  
bananeraies martiniquaises.  
Première partie.  
*Fruits*, 38 (5), 373-387.  
Deuxième partie.  
*Fruits*, 38 (6), 451-459.
18. GODEFROY (J.) et DORMOY (Micheline). 1984.  
Un exemple d'utilisation du diagnostic sol à la programmation de  
la fertilisation en bananeraie.  
*Fruits*, 39 (2), 121-123.
19. GREEN (R.E.). 1981.  
Pesticides-clay-water interactions  
in *Pesticides in soil and water*, W.D. Guenzi (editor)  
*Soil Science Society of America*, 3-38.
20. HERBILLON (A.J.). 1989.  
Chemical estimation of weatherable minerals present in the  
diagnostic horizons of low activity clay soils.  
*Proc. 8th. Int. Soil Classification Workshop 1986, In press*.
21. HSU (Pa Ho). 1963.  
Effect of initial pH, phosphate, and silicate on the determination  
of aluminium with aluminon.  
*Soil Sci.*, 96, 230-238.
22. MARSHALL (K.C.). 1976.  
Interfaces in microbial ecology.  
*Harvard University Press*, 152 p.
23. MARTIN-PREVEL (P.) et MONTAGUT (G.). 1966.  
Essai sol-plante : les interactions dans la nutrition minérale  
du bananier.  
*Fruits*, 21 (1), 19-36.
24. MONTAGUT (G.), MARTIN-PREVEL (P.) et LACOEUILHE  
(J.J.). 1965.  
Essais sol-plante. Nutrition minérale comparée dans six essais.  
*Fruits*, 20 (8), 398-410.
25. NYE (P.), CRAIG (D.), COLEMAN (N.T.) and RAGLAND  
(J.L.). 1961.  
Ion exchange equilibria involving aluminum.  
*Soil Sci. Soc. Proc.*, 25, 14-17.
26. OKAMURA (Y) and WADA (K.). 1984.  
Ammonium-calcium exchange equilibria in soils and weathered  
pumices that differ in cation-exchange material.  
*J. Soil Sci.*, 35, 387-396.
27. ROULLER (J.), BURTIN (G.) et SOUCHIER (B.). 1972.  
La dispersion des sols dans l'analyse granulométrique. Méthode  
utilisant les résines échangeuses d'ions.  
*Bull. ENSAIA, Nancy*, 14 (2), 193-205.
28. SCHACHTSCHABEL (P.). 1940.  
Untersuchung über die sorption der tonmineralien und organischen  
bodenkolloide, und die bestimmung des anteils dieser kolloide und  
der sorption in boden.  
*Kolloide-Beihefte*, 51, 199-276.
29. SCHALSCHA (E.B.), PRATT (P.F.) and DE ANDRADE (L.).  
1975.  
Potassium-calcium exchange equilibria in volcanic ash soils.  
*Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, 1069-1072.
30. SIEFFERMANN (G.). 1973.  
Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun.  
Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial  
au milieu tropical.  
*Mémoires ORSTOM*, n° 66, Paris.
31. VOINOVITCH (I.A.), DEBRAS-GUEDON (J.) et LOUVRIER  
(J.). 1982.  
L'analyse des silicates.  
*Hermann, Paris*.
32. WADA (K.). 1985.  
The distinctive properties of andosols.  
*Advances in Soil Science*, 2, 174-229.
33. WADA (S.I.) and MIZOTA (T.). 1982.  
Iron-rich halloysite (10 Å) with crumpled lamellar morphology  
from Hokkaido, Japan.  
*Clays Clay Miner*, 30 (4), 315-317.

#### ROLLE DER EINZELBESTANDTEILE VULKANISCHER BÖDEN UND IHRER ERTRAGSEIGENSCHAFTEN IM BANANEN- AGROSYSTEM VON KAMERUN.

B. DELVAUX.

*Fruits*, Jun. 1989, vol. 44, n° 6, p. 309-319.

**KURZFASSUNG** - In Kamerun werden Exportbananen in der Hauptsache auf Böden angebaut, die von Basaltpyroklasten abstammen. Je nach Alter des Muttergesteins differenzieren sich die Böden gemäss der zeitlichen Folge von Lavaböden, Braunerden und eisenhaltigen Böden. Das hohe Aufkommen an Kalk und Magnesium in den Lavaböden und die geringe Retention an Kalium durch organische und allophane Kolloide erklären den in den Bananenpflanzen häufig auftretenden Kaliummangel. In den von wasserhaltigem Hallosyt beherrschten Braunerden resultiert der ausgeglichene Kationenbelag aus den Kalk-Magnesium-Reserven und einer überaus selektiven Kalium-Adsorption. Die schwachen Magnesiumreserven der eisenhaltigen Böden, ihre Azidität und ihre hohe Sättigung mit Tonerde favorisieren die selektive Kalium-Retention im Vergleich zu den bivalenten Ca- und Mg-Kationen, die für das an Bananenpflanzen dieser Böden häufig beobachtete Magnesiumblau verantwortlich zeichnen. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine präzise Charakterisierung der Böden und das Studium ihrer Ionenaustausch-Tauglichkeit eine Erklärung für ihr Verhalten in einem Anbausystem liefern bzw. solches Verhalten vorausbestimmen lassen.

#### PAPEL DE LOS CONSTITUYENTES DE LOS SUELOS VOLCANICOS Y DE SUS PROPIEDADES DE CARGA EN EL FUNCIONAMIENTO DEL AGROSISTEMA BANANERO EN CAMERUN.

B. DELVAUX.

*Fruits*, Jun. 1989, vol. 44, n° 6, p. 309-319.

**RESUMEN** - En Camerún, el cultivo bananero de exportación se practica principalmente en suelos derivados de piroclastos basálticos. En función de la edad del material parental, los suelos se diferencian según la cronosecuencia andosuelos → suelos bruñidos → suelos ferrálticos. Las reservas calco-magnésicas elevadas de los andosuelos y la escasa retención del potasio por los coloides orgánicos y alofánicos explican aquí la observación frecuente de carencias potásicas sobre bananos. En los suelos bruñidos, dominados por la halosita hidratada, el estado de las reservas calco-magnésicas y una absorción altamente selectiva del potasio están en el origen de una guarnición catiónica equilibrada. Las escasas reservas magnésicas de los suelos ferrálticos, su acidez y su saturación aluminica elevada favorecen la retención selectiva del potasio con relación a los cationes divalentes Ca, Mg, en el origen del «azul magnésico», observado frecuentemente sobre los bananos en estos suelos. Estos resultados muestran que una caracterización detallada de los suelos y el estudio de sus propiedades de intercambio iónico permiten explicar su comportamiento en un sistema cultivado, e incluso predecirlo.