

Etude expérimentale de la dynamique du potassium et du magnésium

dans quelques sols tropicaux représentatifs des zones de culture du palmier à huile

P. FALLAVIER (1) et J. OLIVIN (2)

Résumé. — La dynamique du potassium et du magnésium est étudiée en laboratoire, à l'aide de colonnes de terre de 15 à 20 cm, provenant de quelques sols tropicaux représentatifs des zones de culture du palmier à huile. Des colonnes de 2,5 kg de sols de La Mé (Côte d'Ivoire) et Aek Loba (Indonésie), reçoivent 2,3 mé/100 g de potassium sous la forme KCl, puis sont arrosées pendant 25 jours, la hauteur d'eau reçue étant de 875 mm. Respectivement, 17,3 et 46 p. 100 du potassium apporté est retenu, principalement par échange avec Ca et Mg. D'autre part des colonnes de 400 g reçoivent 1 mé/100 g de potassium ou magnésium sous la forme chlorure, puis on fait percoler l'équivalent de 714 mm d'eau en continu pendant 92 h 30. Dans les sols de La Mé, Aek Loba, Aek Kwasan (Indonésie) et Pobé (Bénin), le potassium retenu sature 30 p. 100 de la CEC. Sur le sol de Tocache (Pérou), 78,1 p. 100 du magnésium apporté est retenu par échange avec Ca. Pour les quatre sols d'Equateur, la lente migration du Mg rend incertain l'établissement de bilans minéraux. Cependant les taux de saturation de la CEC par le magnésium, compris entre 5,2 et 22,5 p. 100 sont cohérents avec les résultats agronomiques.

INTRODUCTION

Le potassium est l'un des éléments nutritifs fondamentaux pour la croissance végétale et la production de régimes du palmier à huile. Une production moyenne annuelle de 15 tonnes de régimes/ha mobilise par ses exportations et immobilisations environ 100 kg de potassium par ha, qui souvent ne peuvent être couverts que par des apports d'engrais : 70 p. 100 des expériences aux champs connues répondent à la fertilisation potassique mais ces réponses sont très variables. Ainsi, les doses optimales apportées varient de 1,5 à 3,5 kg de KCl/arbre/an (220 à 500 kg de KCl/ha/an), et les augmentations de rendements s'étagent de 6 à 14 t de régimes/ha par tonne de KCl appliquée.

L'IRHO a pu montrer, grâce à son réseau expérimental, que les teneurs foliaires en K sont sensibles à la déficience : en dessous d'une teneur de 0,9 p. 100 du poids sec de la feuille de rang 17, le rendement est limité par la déficience potassique. L'utilisation du diagnostic foliaire permet donc de gérer la nutrition potassique. Cependant, sur certains sols, la règle n'est pas vérifiée : les teneurs foliaires en K restent voisines de 0,8 p. 100 malgré l'application de fortes fumures potassiques de 5 kg/arbre/an dans les plantations du Nord de Sumatra.

La carence en magnésium est mise nettement en évidence par le diagnostic foliaire. Les essais conduits, en Equateur, notamment ont montré des différences de réponses très importantes aux apports de $MgCl_2$. Une étude antérieure conduite en laboratoire [Fallavier, 1982] avait souligné dans ce cas l'absence de mobilité du magnésium dans le sol où aucune réponse n'est obtenue.

L'objet de cet article est de préciser la dynamique du potassium et du magnésium dans le sol, grâce à l'utilisation d'une technique de percolation de solutions fertilisantes à travers des colonnes de terre. Une partie des travaux décrits ici a fait l'objet d'une thèse [Ouvry, 1985].

I. — LES CATIONS ALCALINS ET ALCALINO-TERREUX DANS LE SOL

On distingue schématiquement 4 compartiments pour les cations alcalins et alcalino-terreux dans le sol :

1. — **Les cations minéraux** sont contenus dans les minéraux primaires ; par altération lente (par hydrolyse essentiellement) ils sont libérés dans la solution du sol ou incorporés dans les minéraux argileux néoformés : gibbsite (hydrolyse forte), kaolinite (hydrolyse moyenne), montmorillonite (hydrolyse faible) [Pedro, 1979].

2. — **Les cations échangeables** représentent la fraction des cations disponibles à un instant donné, retenus par attraction électrostatique à la surface des colloïdes minéraux et organiques du sol pour équilibrer les charges négatives de ces derniers. La fraction colloïdale minérale des sols tropicaux est surtout constituée de minéraux à charges variables (minéraux 1/1, hydroxydes de Fe, Al). En d'autres termes, la CEC varie en fonction du pH et de la force ionique de la solution du sol [Van Raij, Peech, 1972].

La matière organique porte également des charges variables : son influence se manifeste lorsque le pH du sol dépasse le pKa des groupements acides qui la composent (environ 5,5 à 6).

Sur le complexe absorbant, les alcalins, les alcalino-terreux ainsi que les cations Al^{+++} , H^+ , Mn^{++} dans les sols acides, sont en concurrence. Les échanges entre ces cations se réalisent plus ou moins facilement en fonction de leur rayon, leur valence et leur concentration. Ils dépendent aussi de la nature des minéraux argileux.

Pour les kaolinites, l'ordre de sélectivité croissante basé sur des quantités d'ions retenus est le suivant : $Na < H < K < Mg < Ca$ [d'après Schachtschabel, 1940].

Goulding [1983] propose pour les monovalents un classement différent basé sur les activités des ions : $Na < H < K, NH_4$.

Dans le cas d'échanges entre K et Ca, K et Mg, le sol marque souvent une préférence pour K [Udo, 1978 ; Pleyrier *et al.*, 1979]. Dans le cas d'échanges entre K et Al, les résultats publiés sont moins nets. Sivasubramanian et Tali-

(1) Directeur du Laboratoire d'analyses des sols du CIRAD (*).

(2) Division Agronomie, IRHO-CIRAD (*).

(*) CIRAD, B. P. 5035 — 34032 Montpellier Cedex (France).

budeen [1972] ont trouvé que K est préférentiellement échangé tant qu'il ne sature pas la CEC au-delà de 30 p. 100.

3. — La forme soluble des cations est souvent confondue avec la forme échangeable car les échanges sont rapides entre ces deux formes et l'analyse ne les sépare pas distinctement.

4. — La forme rétrogradée joue un rôle important dans la dynamique du potassium. Il peut être fixé sur les sites d'échange interfoliaires des minéraux gonflants et piégé dans des cavités hexagonales par rapprochement des feuillets argileux.

La rétrogradation est un processus complexe qui dépend notamment :

— de l'énergie d'hydratation du cation : à la différence de Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} , l'ion K^+ perd facilement son eau d'hydratation, ce qui favorise le rapprochement des feuillets argileux,

— de la taille des cavités hexagonales des minéraux argileux : le rapprochement des feuillets est facilité par la correspondance entre les tailles des cations et des cavités,

— de la densité de charge sur les feuillets argileux,

— de la succession des cycles dessiccation-humectation qui facilite le réarrangement des cations interfoliaires et le rapprochement des feuillets.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. — Les sols étudiés proviennent des essais de l'IRHO (Tabl. I) présentant une diversité de réponses aux fumures potassique et magnésienne. Tous les échantillons ont été prélevés dans la couche 0-20 cm.

Les principales caractéristiques physico-chimiques ont été rassemblées dans le tableau II. L'analyse du complexe absorbant a été faite par la méthode utilisant le chlorure de cobaltihexamine [Orsini et Rémy, 1976], mieux adaptée aux sols tropicaux acides que la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7 [Fallavier *et al.*, 1985]. Elle conduit à des CEC plus faibles car elle ne prend pas en compte les charges développées quand le pH croît jusqu'à 7.

Le potassium rétrogradé est évalué par différence entre le potassium extrait par HNO_3 bouillant 1 N et le potassium échangeable.

2. — Description des expériences.

Une 1^{re} série d'expériences en colonnes de terre dans laquelle les apports de solution percolante sont discontinus a été réalisée. Deux tailles de colonnes ont été employées : un modèle de 120 mm de diamètre, contenant environ 2,5 kg de terre sur une hauteur de 15 à 18 cm selon la densité du sol, et un modèle plus petit de 43 mm de diamètre recevant environ 400 g de terre sur une hau-

TABLEAU I. — Origine des sols étudiés (*Origin of the soils studied*)

Origine (<i>Origin</i>)	Essai (<i>Trial</i>)	Sol (<i>Soil</i>)	Comportement agronomique du palmier (<i>Agronomical behaviour of the oil palm</i>)
Côte d'Ivoire-La Mé (LM)	LM-CP23 parcelles (<i>plots</i>) 6 & 21	Ferrallitique sur sables tertiaires (<i>Ferrallitic on tertiary sand</i>)	Pauvres en K échangeable - Carence bien corrigée par des apports d'engrais (<i>Poor in exchangeable K. Deficiency well corrected with fertilizer applications</i>)
Indonésie (<i>Indonesia</i>)-Aek Loba (AL)	AL-CP1 PO KO MgO parcelles (<i>plots</i>) 8, 14 & 20	Ferrallitique-andique (<i>Ferrallitic andic</i>)	Faible teneur en K échangeable. Très faible réponse du palmier aux apports de K (<i>Low exchangeable K content. Very low response to K applications</i>)
Indonésie (<i>Indonesia</i>)-Aek Kwasan (AK)	AK-CP1	Ferrallitique sur sédiments tertiaires (<i>Ferrallitic on tertiary sediments</i>)	Faible teneur en K échangeable. Réponse du palmier (teneurs foliaires) aux apports du KCl (<i>Low exchangeable K content. Leaf content response to KCl applications</i>)
Bénin-Pobé (PB)	PO-GP7 sol nu (<i>bare soil</i>)	Ferrallitique moyennement désaturé (<i>Moderately desaturated ferrallitic</i>)	Sol pauvre en K échangeable. Carence corrigée par des apports modérés (<i>Soil poor in exchangeable K. Deficiency corrected with moderate applications</i>)
Equateur (<i>Ecuador</i>)-Pueblo Nuevo (PN)	MO PO (fumure - <i>fertilizer</i> - b)	Sol rouge ferrallitique sur sédiments argileux (<i>Red ferrallitic on clayey sediments</i>)	Sans carence en Mg - Sol pauvre (<i>No Mg deficiency. Poor soil</i>)
Equateur (<i>Ecuador</i>)-Rio Blanco (RB)	G12B (fumure - <i>fertilizer</i> - a)	Sol brun volcanique peu épais sur ferrallitique sableux (<i>Shallow brown volcanic on sandy ferrallitic</i>)	Carence en Mg peu marquée, facile à corriger (<i>Slight Mg deficiency easy to correct</i>)
Equateur (<i>Ecuador</i>)-Shushufindi (SF)	SH-CP2 sans engrais (<i>no fertilizers</i>)	Andosol	Déficiência en Mg facile à corriger (<i>Mg deficiency easy to correct</i>)
Pérou (<i>Peru</i>)-Tocache (PE)	PE-CP1 NO KO MgO parcelles (<i>plots</i>) 27, 28, 45 & 46	Sol alluvial	Très légère déficience en Mg au jeune âge (<i>Very slight Mg deficiency on young oil palms</i>)
Equateur (<i>Ecuador</i>)-Tatiana (TT)	TT-CP1 NO KO MgO parcelles (<i>plots</i>) 15	Brun volcanique profond (<i>Deep brown volcanic</i>)	Carence en Mg très prononcée, très difficile à corriger par les apports d'engrais (<i>Very marked Mg deficiency, very difficult to correct with fertilizer applications</i>)

teur de 20 cm. Les apports de solution sont respectivement de 420 cm³ et 50 cm³ chaque jour pendant 25 jours. Ces volumes sont versés en une fois en haut des colonnes.

Toutes les colonnes sont en PVC et munies d'un robinet à leur base. Leur préparation est la même quelle que soit la taille. Une couche de quartz (sable de Fontainebleau) de 1 cm repose sur un préfiltre placé au fond de la colonne afin d'assurer le drainage et une percolation homogène sur toute la section de la colonne. Le sol sec et tamisé à 2 mm est déposé par-dessus par tranche de 3 cm. Chaque couche de terre est légèrement tassée mécaniquement par la chute d'un poids de 200 g d'une hauteur de 10 cm. Un deuxième préfiltre est placé au-dessus de la dernière couche pour bien répartir la solution sur toute la section de la colonne.

Avant toute percolation, le sol est saturé à l'eau distillée introduite par le robinet au bas de la colonne. On arrête le remplissage lorsque l'eau apparaît à la surface de la colonne. On laisse ensuite ressuyer en recueillant l'eau gravitaire qui sera réintroduite dans la colonne à l'occasion du premier arrosage.

Ce modèle a été utilisé pour les sols de la Mé et Aek Loba. Deux traitements ont été testés : témoin et apport de KCl de 2,3 mé/100 g de sol. Deux fréquences d'arrosage ont été comparées : arrosage quotidien et tous les trois jours. Les 25 arrosages correspondent à une hauteur d'eau de 875 mm soit, respectivement, 47 et 38 p. 100 des pluviométries annuelles moyennes des lieux où ont été prélevés ces échantillons. Deux répétitions de chaque traitement ont été faites, c'est-à-dire que 4 colonnes de chaque modèle ont été réalisées avec et sans KCl pour chaque sol. Sont recueillis pour analyses, 25 percolats correspondant aux 25 arrosages.

En fin d'expérience, la colonne de sol est démolée et coupée en 8 tranches : les cations échangeables, le pH et la CEC sont analysés dans chacune d'elle. Ouvry [1985] a vérifié sur ces deux sols que le mode d'arrosage (apport quotidien fractionné ou non), la fréquence d'arrosage

(chaque jour ou tous les 3 jours) n'ont pas d'influence significative sur les résultats obtenus, excepté sur l'éluion du fer.

Une 2^e expérience en colonnes de terre a été réalisée afin de dégager une méthode simple, rapide et standardisable : des colonnes de 43 mm de diamètre, contenant environ 400 g de terre sont préparées comme précédemment. Un apport de 1 mé/100 g de K a été fait pour les sols LM, AL, AK, PB et de 1 mé/100 g de Mg pour les 5 autres sols PN, RB, SF, PE, TT. Cet apport est fait en une seule fois par un volume approprié de solutions 0,05 N, soit 80 ml pour un poids de terre de 400 g. Ensuite, de l'eau distillée percole à raison de 11,1 ml/h. Deux percolats sont recueillis par colonne au bout de 24 h 30 et de 92 h 30. La quantité totale d'eau apportée correspond à une hauteur de 714 mm. Les deux percolats et les moitiés inférieures et supérieures de la colonne sont analysés.

III. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. — Apports par arrosages (Expérience n° 1).

Les résultats cumulés des percolats (Tabl. III) représentent la moyenne des résultats des huit colonnes recevant du KCl. La quantité d'ions lessivés par l'apport de KCl est la différence des quantités lessivées dans la colonne KCl et la colonne témoin. L'examen des courbes d'éluion des ions (Fig. 1, 2) montre que les vitesses d'éluion d'un ion donné sont différentes pour les deux colonnes. Elles sont influencées par la force ionique des solutions notamment. La quantité lessivée peut apparemment décroître en fin d'expérience. Ainsi pour AL la différence entre Ca élué dans la colonne KCl et la colonne témoin est de 773 µé/100 g après 5 percolats et tombe à 704 µé/100 g au bout de 25. Cette approximation inévitable diminue lorsque le

TABLEAU II. — Principales caractéristiques physico-chimiques des sols
(Main physico-chemical characteristics of the soil)

	LM	AL	AK	PB	PN	RB	SF	PE	TT
pH eau (water)	4,70	5,20	6,15	6,60	4,80	5,65	5,55	5,50	6,15
pH KCl	3,80	4,20	4,70	5,65	3,80	4,95	4,70	4,75	5,50
Argile (Clay) %	11,6	22,7	50,9	5,20	49,6	2,3	38,5	24,2	15,3
Limons fins %	2,8	1,6	3,4	2,1	24,1	20,1	16,7	26,4	30,6
C %	0,93	1,24	1,76	0,7	1,31	3,76	2,35	1,50	2,41
K rétrogradé mé/100 g	0,12	0,61	0,10	0,19	0,70	0,29	0,84	0,95	0,98
Cations échangeables en (Exchangeable cations in) mé/100 g (1)									
K	0,04	0,10	0,05	0,04	0,24	0,11	0,22	0,06	0,19
Ca	0,30	1,10	0,54	1,72	12,03	1,35	3,00	4,60	10,95
Mg	0,13	0,14	0,16	0,55	11,50	0,37	1,09	0,88	1,83
Na	0,02	0,03	0,02	0,01	0,16	0,07	0,01	0,06	0,12
NH ₄	0,13	0,12	0,46	0,46	0,38	0,31	0,31	0,38	0,38
Al	0,45	0,16	0,42	0,0	4,40	0,03	0,10	0,0	0,0
H	0,13	0,04	0,07	0,0	0,25	0,01	0,04	0,0	0,0
CEC mé/100 g	1,11	3,11	1,57	2,45	25,70	2,20	4,80	5,53	12,40
Minéralogie (Mineralogy)	K, Go	K, Gb	K	K	Mt, K	Am, F	Am, Q	C, I, K	K, Q

(1) Méthode d'analyse utilisant le chlorure de cobalthexamine (Method of analysis using cobalthexamine chloride).

K : kaolinite ;
Go : goethite ;
Gb : gibbsite ;

Mt : montmorillonite ;
Am : amorphes (amorphous) ;
F : feldspath.

Q : quartz ;
C : chlorite ;
I : illite ;

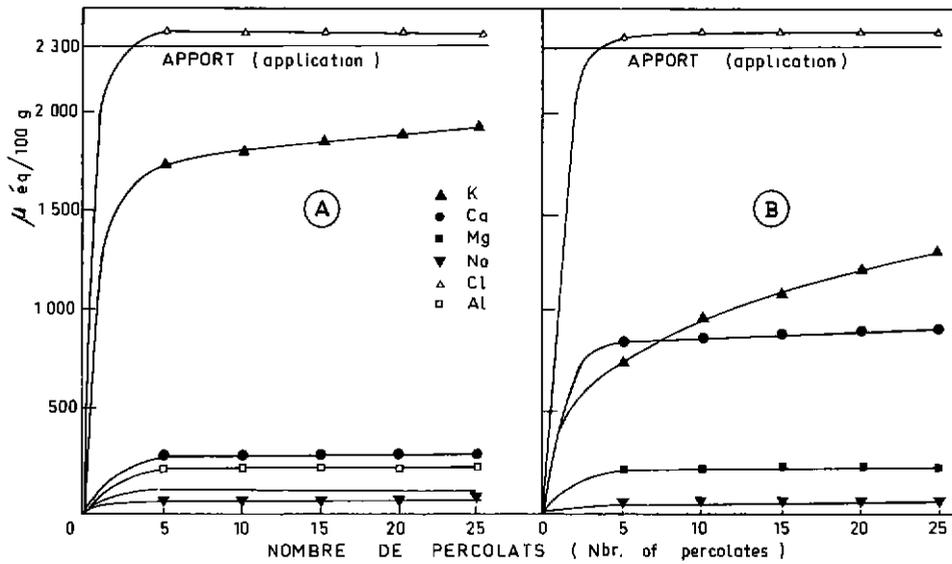


FIG. 1. — Evolution des percolats cumulés moyens bruts pour les colonnes KCl (Evolution of mean gross cumulative percolates for KCl columns).

— (A) : La Mé.
— (B) : Aek Loba

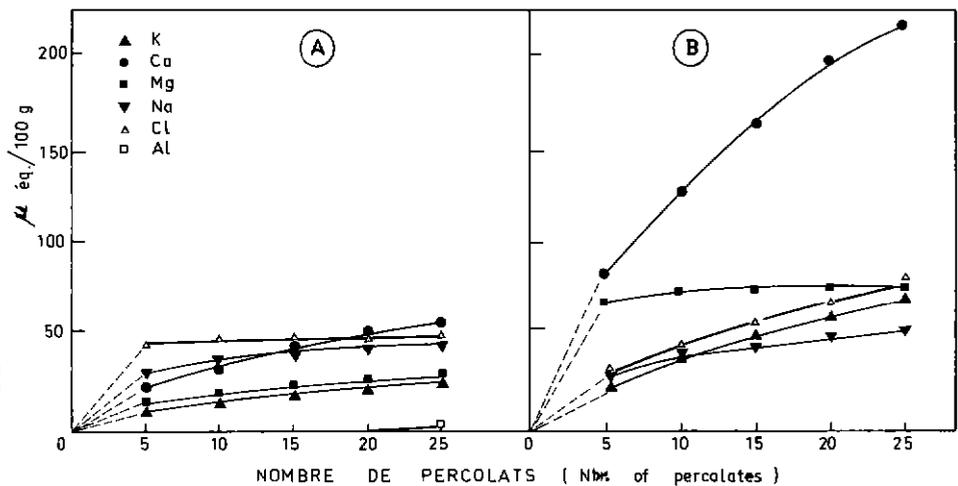


FIG. 2. — Evolution des percolats cumulés moyens pour les colonnes témoins (Evolution of mean cumulative percolates for the control columns).

— (A) : La Mé
— (B) : Aek Loba.

TABLEAU III. — Quantités cumulées d'ions lessivés dans l'expérience avec arrosages (Cumulative quantities of leached ions in the experiment with watering)

		LM	AL
K ⁺ apporté (applied)	$\mu\text{é}/100\text{g}$	2 300	2 300
Cations lessivés (Leached cations)	$\mu\text{é}/100\text{g}$		
K ⁺		1 903	1 247
Ca ⁺⁺		233	704
Mg ⁺⁺		83	159
Na ⁺		3	0
Al ⁺⁺⁺		232	0
K ⁺ retenu (remaining)		397	1 053
Sommes des cations lessivés sauf K (Sum of leached cations except K)		551	863
Anions lessivés (Leached anions)	$\mu\text{é}/100\text{g}$		
Cl ⁻		2 358	2 345

TABLEAU IV. — Quantité de fer lessivé selon le mode d'arrosage et le traitement (Quantity of iron leached depending on watering and treatment) — mg/100 g —

	Témoin	KCl
Arrosage quotidien	1,965	1,009
Arrosage tous les 3 jours	5,498	3,190

nombre de percolats augmente ; elle reste faible et n'influence pas significativement les bilans tirés de ces expériences.

L'équilibre anions-cations est respecté : pour La Mé le rapport cations/anions est de 1,04. Pour Aek Loba il est

de 0,90 mais NH₄⁺ n'a pas été analysé. En prenant la valeur trouvée dans la seconde expérience ce rapport est de 0,95.

Les percolats de La Mé sont colorés ; ils contiennent une quantité importante de fer, qui précipite lorsque le percolat vieillit : elle varie avec le type d'arrosage et le traitement (Tabl. IV). Il est probable que la tendance à la déferrification de ce type de sol [Fauck, 1974] est accentuée car le sol reste en régime saturé et en milieu réducteur au cours de l'expérience.

Les pH des percolats de Aek Loba restent voisins de la neutralité, quel que soit le traitement. Pour La Mé, ceux de la colonne témoin sont voisins de la neutralité, tandis

TABLEAU V. — Bases échangeables des sols après 25 arrosages (colonnes de 2,5 kg de terre)
(Soil exchangeable bases after 25 waterings - 2.5 kg earth columns)

	LM			AL		
	T (C)	KCl	KCl-T (-C)	T (C)	KCl	KCl-T (-C)
K ⁺	0,04	0,42	+ 0,38	0,13	1,03	+ 0,90
Ca ⁺⁺	0,32	0,10	- 0,22	1,44	0,93	- 0,51
Mg ⁺⁺	0,10	0,01	- 0,09	0,25	0,08	- 0,17
Na ⁺	0,02	0,01	- 0,01	0,02	0,01	- 0,01
Al ⁺⁺⁺	0,89	0,87	- 0,02	0	0	0
Somme de tous les cations (Sum of cations)	1,37	1,41	+ 0,04	1,84	2,05	+ 0,21

que dans le traitement KCl, les premiers percolats sont acides (4, 4) et tendent vers la neutralité après le 10^e. Cette variation correspond au lessivage de l'aluminium dans les premiers percolats.

Les résultats d'analyses des sols sont présentés dans le tableau V. Les résultats obtenus sur la colonne témoin sont sensiblement différents de l'analyse initiale du sol. La seule percolation à l'eau modifie la répartition des ions échangeables en raison de l'augmentation du pH qui favorise la solubilisation des cations basiques et l'augmentation de la CEC [Pratt *et al.*, 1969, Morais *et al.*, 1976].

Les profils des bases échangeables le long des colonnes (Fig. 3, 4) montrent une décroissance en K⁺ échangeable avec la profondeur, alors que Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ échangeables sont constantes (La Mé) ou légèrement décroissantes (Aek Loba). La variabilité de K⁺ échangeable provient principalement du mode d'arrosage.

Pour La Mé, le bilan des analyses de percolats indique que 17,3 p. 100 du K apporté est retenu par le sol, soit 397 µé/100 g. Cette valeur concorde avec l'accroissement du

potassium échangeable révélé par l'analyse du sol : 380 µé/100 g.

Les pertes en Ca et Mg mesurées par l'analyse des percolats correspondent aux diminutions de leur forme échangeable : 233 µé/100 g de Ca lessivé pour une diminution de 220 µé/100 g de Ca échangeable, 83 µé/100 g de Mg lessivé pour une diminution de 90 µé/100 de Mg échangeable. Le rôle du sodium est très faible. De ces bilans concordants on peut déduire que 85 p. 100 du potassium retenu est échangé avec les cations Ca, Mg, Na.

Le traitement au KCl, augmentant la force ionique de la solution du sol, peut augmenter la densité des charges négatives [Uehara, Gillman, 1981]. Ceci se vérifie dans tous les sols étudiés ici. Bien que faible, cette augmentation n'est pas négligeable quand la capacité d'échange est faible. Elle peut être à l'origine de la rétention de 40 µé/100 g de potassium dans le sol de La Mé.

Globalement Al⁺⁺⁺ semble peu participer aux échanges — la diminution d'Al échangeable n'est que de 20 µé/100 g — mais il est lessivé en quantité importante

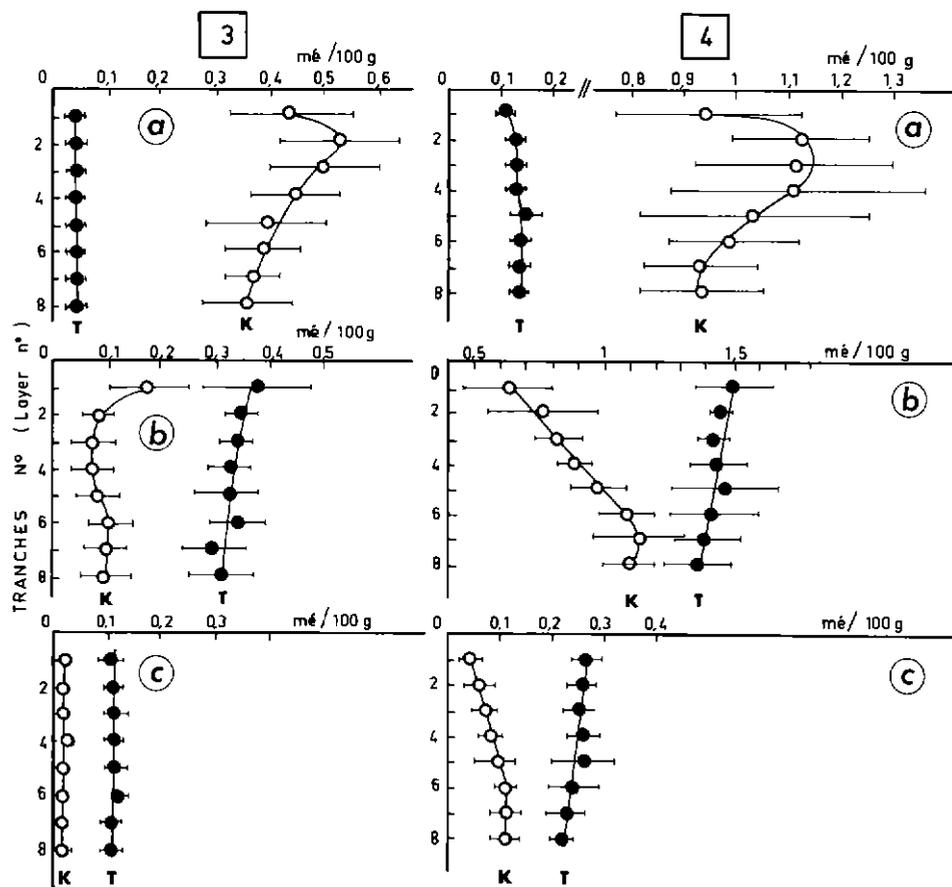


FIG. 3-4. — Profil de répartition des cations échangeables dans les colonnes de sol. (Profile of the distribution of exchangeable cations in the columns).

- (3) : La Mé.
- (4) : Aek Loba.
- T : colonne témoin (Control column).
- K : colonne « KCl » (KCl column).
- a : Potassium.
- b : Calcium.
- c : Magnésium.

(232 $\mu\text{é}/100\text{ g}$) à la suite de la dissolution de composés alumineux selon le schéma [Amédée et Peech, 1976] :



où R est un radical quelconque, organique ou minéral.

Dans le sol de *Aek Loba*, 46 p. 100 du potassium apporté est retenu d'après les analyses de percolats (1 053 $\mu\text{é}/100\text{ g}$) alors que le bilan des bases échangeables indique un accroissement du potassium échangeable de 900 $\mu\text{é}/100\text{ g}$: 153 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ de potassium sont retenus sous une forme non échangeable, rétrogradés dans les minéraux 2/1 présents à l'état de traces [Ouvry, 1985].

Les bilans en Mg sont concordants : perte de 159 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ d'après l'analyse des percolats, diminution du Mg échangeable de 170 $\mu\text{é}/100\text{ g}$.

Par contre le lessivage du Ca, 704 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, est plus important que la diminution de Ca échangeable, 510 $\mu\text{é}/100\text{ g}$. La teneur élevée en Ca total (14 $\text{mé}/100\text{ g}$) laisse supposer une dissolution de Ca lors du lessivage, de même que l'allure de la courbe d'éluion représentée sur la figure 2.

Le bilan des échanges du potassium se résume ainsi : 900 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ de potassium sont retenus sous forme échangeable : 690 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ sont échangés avec Ca, Mg et Na et 210 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ sont fixés sur les charges négatives apparues à la suite du traitement KCl. Par ailleurs, 153 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ sont fixés sans doute par rétrogradation. Sur les 46 p. 100 du K retenu, 30 p. 100 sont échangés avec Ca et Mg, 7 p. 100 sont fixés et 9 p. 100 sont retenus en position échangeable sur des sites électro-négatifs développés par le traitement KCl. Cette dernière fraction est susceptible de repasser très facilement en solution car un lavage persistant fait disparaître la raison de son existence en diminuant la force ionique de la solution du sol. Cette observation explique en partie le fait que les quantités de cations retenues, calculées par différences entre les colonnes KCl et témoin, diminuent au-delà du 5^e ou 6^e percolat.

2. — Lessivage en continu (Expérience n° 2).

L'écoulement des percolats au bas des colonnes a été très régulier sur toutes les colonnes : 11,08 \pm 0,18 ml/h. Les apports de K ou Mg ont été de 1 $\text{mé}/100\text{ g}$ pour tous les sols. Les analyses des percolats et des bases échangeables sont rassemblées dans les tableaux VI et VII.

Pour *La Mé*, les percolats colorés en brun contiennent des quantités de fer importantes. En milieu saturé il est sous forme FeOH^{++} [Nalovic, Pedro 1978]. En attribuant la valence 2 au fer, l'équilibre anions-cations est vérifié dans les percolats : 1 156 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ d'anions, 1 104 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ de cations.

En raisonnant comme précédemment, on constate que 29,5 p. 100 du potassium apporté est retenu (295 $\mu\text{é}/100\text{ g}$), mais K échangeable n'a augmenté que de 255 $\mu\text{é}/100\text{ g}$: il reste 40 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ retenu non échangeable. La diminution de Ca et Mg échangeables n'est que de 135 $\mu\text{é}/100\text{ g}$: près de la moitié du K échangé est retenue autrement que par échange avec les cations initialement présents. Il est possible que le lessivage du fer (239 $\mu\text{é}/100\text{ g}$) entraîne la création de charges négatives capables de retenir K^+ , mais les analyses ne permettent pas de conclure.

L'aluminium joue un rôle moins important que dans la 1^{re} expérience car la concentration en KCl est plus faible. Al échangeable diminue de 70 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ dans la moitié supérieure de la colonne et se rééchange dans la moitié inférieure où il augmente de 60 $\mu\text{é}/100\text{ g}$.

La teneur en sulfate dans le percolat est importante : 122 $\mu\text{é}/100\text{ g}$. Son apparition en solution est liée à celle du fer.

Par rapport à la première expérience, deux différences apparaissent : un lessivage de fer très important, et une variation plus faible des bases échangeables due à un état d'avancement des réactions d'échange plus faible, lié à la durée plus courte de l'expérience (3, 8 jours au lieu de 25).

Pour *Aek Loba*, la concordance entre les deux expériences est bonne. On trouve dans le 2^e cas que 85,4 p. 100 du

TABLEAU VI. — Quantités d'ions percolés dans l'expérience avec apports continus
(Quantities of percolated ions in the experiment with continuous applications)

	LM	AL	AK	PB	PN	RB	SF	PE	TT
K^+ apporté (<i>applied</i>) - $\mu\text{é}/100\text{ g}$ -	1 000	1 000	1 000	1 000					
Mg^{++} apporté (<i>applied</i>) - $\mu\text{é}/100\text{ g}$ -					1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
Cations lessivés (<i>leached cations</i>) - $\mu\text{é}/100\text{ g}$ -									
K^+	705	146	438	391	4	23	36	4	6
Ca^{++}	49	496	349	314	196	314	539	701	723
Mg^{++}	62	102	109	287	204	504	296	219	219
Na ⁺	3	3	2	13	5	0	3	15	20
NH_4^+	5	88	50	0	12	36	16	22	13
Al^{+++}	41	5	39	12	14	0	0	0	0
H ⁺									
Fe^{++}	239	0	1	22	0	0	0	0	0
K^+ retenu (<i>remaining K⁺</i>)	295	854	562	609					
Mg^{++} retenu (<i>remaining Mg⁺⁺</i>)					794	496	704	781	781
Somme des cations sauf (<i>Sum of cations except</i>)	399	694	550	648	231	373	594	742	762
Anions lessivés (<i>leached anions</i>) - $\mu\text{é}/100\text{ g}$ -									
Cl^-	1 034	1 024	1 059	1 040	914	974	977	971	975
SO_4^{--}	122	15	33	181					

potassium est retenu, soit 854 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, en contrepartie le lessivage des autres cations est de 694 $\mu\text{é}/100\text{ g}$. L'analyse de sol montre une augmentation de K échangeable de 675 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, correspondant à la diminution de $\text{Ca}^+ \text{Mg}^+ \text{NH}_4^+$ échangeables de 668 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ (en prenant NH_4^+ échangeable égal à NH_4^+ lessivé).

Comme dans la 1^{re} expérience, le bilan magnésien est équilibré et l'on doit admettre qu'il y a dissolution de Ca puisque le Ca lessivé est supérieur à la diminution du Ca échangeable. La quantité de Ca dissoute par jour est la même dans les deux expériences, 19,3 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ et 19,7 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, respectivement (Ca dissout = Ca lessivé - Ca échangé). Le potassium retenu non échangeable est de 179 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, valeur assez voisine des résultats de la 1^{re} expérience (150 $\mu\text{é}/100\text{ g}$).

Le deuxième sol d'Indonésie (*Aek Kwasan*) a un comportement assez similaire à celui d'*Aek Loba* : 56,2 p. 100 de l'apport de K est retenu, soit 562 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ dont 495 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ sous forme échangeable. L'échange avec Ca, Mg et Al correspond à 450 $\mu\text{é}/100\text{ g}$. Le reste, 45 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, peut être retenu soit sur des charges variables créées — bien que cette possibilité soit moins nette que dans les premières expériences, la concentration en KCl étant plus faible — soit par échange avec NH_4^+ : on retrouve en effet 50 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ de NH_4^+ dans le percolat.

Sur le sol de *Pobé* les résultats sont cohérents : 609 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ de K sont retenus (soit 60,9 p. 100 de l'apport) pour un accroissement de 575 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ du potassium

échangeable, correspondant exactement à la diminution de Ca + Mg échangeables. Il y a 26 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ de K fixés non échangeables. Le percolat contient du fer (22 $\mu\text{é}/100\text{ g}$) et du sulfate (181 $\mu\text{é}/100\text{ g}$). Le sol ne contient pas d'aluminium échangeable, 12 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ d'Al sont lessivés : ils proviennent de la dissolution de minéraux.

Dans les 5 autres sols où l'on a fait un apport de magnésium les échanges se font essentiellement avec Ca. A l'exception du sol de *Pueblo Nuevo*, ils ne contiennent pas d'aluminium échangeable et le potassium échangeable est très peu modifié.

Dans le sol du *Pérou*, 78,1 p. 100 du magnésium apporté est retenu, soit 781 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ dont 585 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ sont échangeables avec Ca. L'échange avec K est négligeable : 5 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, cette valeur est à la limite de sensibilité des analyses.

Les 191 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ restants sont sans doute fixés sur des sites d'échanges des minéraux 2/1 présents, non accessibles à l'ion cobalthexamine utilisé dans l'extraction des bases échangeables.

Les trois sols d'origine volcanique d'Equateur présentent des caractéristiques communes : migration lente (*Rio Blanco*) ou très lente (*Tatiana* et *Shushufindi*), constatée par la différence des teneurs en magnésium échangeable entre les moitiés supérieures et inférieures des colonnes ; migration incomplète du chlore à la fin de l'expérience.

Les bilans des tranches de sol (Tabl. VIII) montrent que dans la tranche supérieure, le Mg s'échange essentiellement avec Ca. Pour *Rio Blanco* l'échange se poursuit dans la

TABLEAU VII. — Bases échangeables après lessivages en continu sur petites colonnes
(Exchangeable bases after continuous leaching in small columns)

	LM			AL			AK		
	T (C)	KCl	KCl-T (-C)	T (C)	KCl	KCl-T (-C)	T (C)	KCl	KCl-T (-C)
K ⁺	0,02	0,275	+ 0,255	0,07	0,745	+ 0,675	0,04	0,535	+ 0,495
Ca ⁺⁺	0,21	0,14	- 0,070	0,85	0,43	- 0,420	0,575	0,305	- 0,270
Mg ⁺⁺	0,085	0,02	- 0,065	0,16	0,04	- 0,12	0,15	0,045	- 0,105
Na ⁺	0,01	0,025	+ 0,015	0,015	0,025	+ 0,01	0,01	0,01	0,00
Al ⁺⁺⁺	0,335	0,35	+ 0,015	0,045	0,055	+ 0,01	0,59	0,515	- 0,075
Somme des (Sum of) cations	0,66	0,81	+ 0,15	1,14	1,295	+ 0,155	1,365	1,410	+ 0,045

	PB			PN			RB		
	T (C)	KCl	KCl-T (-C)	T (C)	MgCl ₂	MgCl ₂ -T (-C)	T (C)	MgCl ₂	MgCl ₂ -T (-C)
K ⁺	0,03	0,605	+ 0,575	0,21	0,21	0	0,075	0,080	+ 0,005
Ca ⁺⁺	1,335	1,00	- 0,335	11,39	11,27	- 0,12	1,180	0,825	- 0,355
Mg ⁺⁺	0,410	0,165	- 0,245	9,22	9,65	+ 0,43	0,31	0,72	+ 0,41
Na ⁺	0,045	0,060	+ 0,015	0,08	0,05	- 0,03	0,045	0,075	+ 0,030
Al ⁺⁺⁺	0	0	0	3,89	3,97	+ 0,08	0,04	0,035	- 0,005
Somme des (Sum of) cations	1,820	1,830	+ 0,010	24,79	25,15	+ 0,36	1,65	1,735	+ 0,085

	SF			PE			TT		
	T (C)	MgCl ₂	MgCl ₂ -T (-C)	T (C)	MgCl ₂	MgCl ₂ -T (-C)	T (C)	MgCl ₂	MgCl ₂ -T (-C)
K ⁺	0,39	0,36	- 0,03	0,05	0,045	- 0,005	0,195	0,190	- 0,005
Ca ⁺⁺	3,81	3,41	- 0,40	4,34	3,755	- 0,585	10,50	9,945	- 0,555
Mg ⁺⁺	1,22	1,82	+ 0,60	0,73	1,315	+ 0,585	1,465	2,185	+ 0,72
Na ⁺	0,01	0,01	0	0,015	0,015	0	0,065	0,065	0
Al ⁺⁺⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Somme des (Sum of) cations	5,43	5,60	+ 0,17	5,135	5,130	- 0,005	12,225	12,385	+ 0,16

TABLEAU VIII. — Analyses des bases échangeables dans les parties supérieures et inférieures des colonnes après l'expérience avec arrosage en continu.

(Analysis of exchangeable bases in the upper and lower parts of the columns after the experiment with continuous watering)

	RB	SF	TT	PN
Tranche supérieure (Upper layer)				
$\mu\text{é}/50\text{ g}$				
Ca ⁺⁺	-220	-440	-630	-295
Mg ⁺⁺	+250	+485	+710	+315
K ⁺	+10	-25	-5	0
Na ⁺	+15	0	-10	-25
Al ⁺⁺⁺	0	0	0	+55
Tranche inférieure (Lower layer)				
$\mu\text{é}/50\text{ g}$				
Ca ⁺⁺	-135	+35	+75	+170
Mg ⁺⁺	+160	+115	+10	+110
K ⁺	-5	-5	0	0
Na ⁺	+15	0	+10	-5
Al ⁺⁺⁺	-5	0	0	-10
Colonne entière (Whole column)				
$\mu\text{é}/100\text{ g}$				
Ca ⁺⁺	-355	-405	-555	-125
Mg ⁺⁺	+410	+600	+720	+425
K ⁺	+5	-30	-5	0
Na ⁺	+30	0	0	-30
Al ⁺⁺⁺	-5	0	0	+45

TABLEAU IX. — Résultats globaux (Overall results).

	LM 1	LM 2	AL 1	AL 2	AK 2	PB 2	PN 2	RB 2	SF 2	PE 2	TT 2
	K	K	K	K	K	K	Mg	Mg	Mg	Mg	Mg
Apport (Application) $\mu\text{é}/100\text{ g}$	2,3	1	2,3	1	1	1	1	1	1	1	1
P. 100 retenu (remaining)	17	29,5	46	85,4	56,2	60,9	31,5 à 79,4	35,5 à 49,6	46,5 à 70,4	78,1	64,5 à 78,1
dont (of which)	15	13,5	30	66,8	49,5	58,5	31,5	35,5	46,5	59	64,5
échange avec (exchanged with)	Ca, Mg Al, Na	Ca, Mg	Ca, Mg	Ca, Mg NH ₄	Ca, Mg NH ₄	Ca, Mg	Ca (K)	Ca	Ca (K)	Ca (K)	Ca (K), (Na)
Retenu échangeable par un méca- nisme (nouvelle charge) (Remaining exchangeable through a mechanism — new charge —)	2	12	9	0,7	0	0					
Retenu autrement que par échange (fixé ou soluble) (Remaining other than through exchange — fixed or soluble —)	0	4	7	17,9	6,7	2,4	0 à 47,9	0 à 14,1	0 à 23,9	19	0 à 13,6

(1) Colonnes grand modèle (Large columns).

(2) Colonnes petit modèle (Small columns).

tranche inférieure, alors que pour les deux autres sols de Tatiana et Shushufindi, il y a enrichissement en Ca et Mg échangeables. Cependant les teneurs en chlore indiquent que l'éluion des ions introduits n'est pas terminée : le Mg qui n'a pas encore réagit mais se trouve encore en solution, est compté comme Mg échangeable et cette forme est surestimée. De même la tranche inférieure des deux sols s'enrichit en Ca échangeable + soluble.

Compte tenu de ces observations, on peut tirer les conclusions suivantes :

Pour Rio Blanco 496 $\mu\text{é}/100\text{ g}$ sont retenus dans le sol au moment où la percolation a été arrêtée, mais une fraction inconnue est sous forme soluble. Cette valeur est donc un majorant de la valeur qui aurait été obtenue si l'expérience avait été poursuivie.

De même le Mg échangé, 410 $\mu\text{é}/100\text{ g}$, est trouvé par excès.

La diminution du Ca échangeable semble être une valeur plus réaliste du Mg échangé ; 355 $\mu\text{é}/100\text{ g}$. Cela conduit à situer le Mg retenu entre 35,5 et 49,6 p. 100 de l'apport ;

la valeur inférieure correspond au Mg échangé, le reste englobe Mg soluble et éventuellement Mg rétrogradable.

Pour Shushufindi, en appliquant le même raisonnement sur la tranche supérieure, on constate que 465 $\mu\text{é}$ (pour 50 g) sont échangés avec Ca et K : il reste 704 $\mu\text{é}/100$ g dans la colonne. Le pourcentage de Mg retenu est compris entre 46,5 et 70,4 p. 100 de l'apport. Il y a une fraction assez importante (23,9 p. 100) dont on ignore la destination.

Pour Tatiana, 645 $\mu\text{é}/100$ g de Mg sont échangés avec Ca, K, Na, alors que 781 $\mu\text{é}/100$ g sont restés dans la colonne. On a donc entre 64,5 et 78,1 p. 100 du magnésium apporté qui est retenu.

Dans le sol de Pueblo Nuevo, riche en montmorillonite, le temps d'accès aux sites d'échange est long. Le chlore n'est pas totalement élué en fin d'expérience. Dans la partie supérieure de la colonne, 315 $\mu\text{é}/50$ g de Mg se sont échangés avec Ca et K. Il apparaît de l'aluminium, sans doute en solution plutôt qu'échangeable. Le bas de la colonne contient du Mg et du Ca en solution. Il y a entre 31,5 et 79,4 p. 100 de Mg retenu, ce dernier chiffre étant tiré des analyses de lessivats.

IV. — COMPORTEMENT AGRONOMIQUE ET LESSIVAGE DES CATIONS — CONCLUSIONS

Dans les quatre sols où l'on a apporté du potassium, il s'échange avec Ca et Mg principalement. Proportionnellement c'est Mg qui est le plus facilement déplacé : le rapport Mg éch./Ca éch. est divisé par un facteur compris entre de 2 et 2,5.

Rapportée à 1 $\text{mé}/100$ g de CEC, la rétention de K varie peu dans ces sols à kaolinite et hydroxydes de Fe et d'Al : elle va de 24,8 p. 100 pour PB à 35,8 p. 100 pour AK. Ces taux sont élevés et on comprend que les déficiences en potassium soient faciles à corriger. Pour Aek Loba les apports de KCl n'entraînent pas d'absorption supplémentaire de K par les plantes car le rapport K/Ca reste faible [Ouvry, 1985].

Parmi les sols ayant reçu du magnésium, RB, SH et PE ont révélé au champ une légère déficience en Mg, facile à corriger. Ramenée à 1 $\text{mé}/100$ g de CEC, leur rétention est comprise entre 9,7 et 22,5 p. 100 et le rapport Mg éch./CEC entre 0,16 et 0,23. Pour TT, dont la carence est très difficile à corriger, la rétention est comprise entre 5,2 et 6,3 p. 100 et le rapport Mg éch./CEC est de 0,15.

Pour PN, riche en magnésium échangeable et avec une CEC élevée (25,7 $\text{mé}/100$ g), le rapport Mg éch./CEC est de 0,45 et la rétention, ramenée au $\text{mé}/100$ g de CEC, n'est que de 1,2 à 3,1 p. 100.

La figure 5 montre que le taux de rétention du Mg par unité de CEC décroît lorsque le taux de saturation en Mg

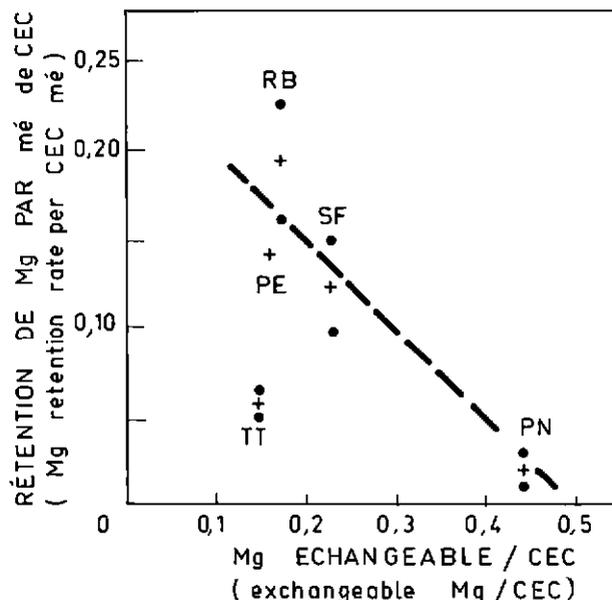


FIG. 5. — Taux de rétention du magnésium par rapport aux taux de saturation en Mg (*Magnesium retention rates compared to Mg saturation rates*)

croît. Le sol de Tatiana se démarque très nettement des sols dont la carence est inexistante ou facile à corriger.

Par ailleurs la fixation du K apporté s'effectue par échange avec Ca et Mg alors que le Mg apporté s'échange principalement avec Ca, sans déplacer K.

Ce phénomène est peut-être à l'origine de l'effet aggravant d'un excès de fumure potassique sur la déficience magnésienne, alors que la fumure magnésienne n'induit pas de déficience potassique.

Le tableau IX fait la synthèse des résultats obtenus. Sur les méthodologies utilisées, il faut faire les observations suivantes :

— Le modèle en colonne à arrosages quotidiens conduit à des résultats sûrs : les bilans anions-cations des percolats sont bons, les réactions d'échanges sont terminées au bout de 25 percolats (les teneurs en cations sont très proches de zéro). Son principal inconvénient réside dans sa lourdeur : durée, très grand nombre d'analyses à réaliser.

— Le modèle à percolation continue s'est révélé moins performant pour les types de sols étudiés : au bout de 92 h, équilibres incomplets, difficultés pour obtenir des bilans cohérents en raison d'un certain nombre de mécanismes parasites induits par la méthode : dissolution, déstructuration du sol, milieu très réducteur.

Des conclusions plus définitives seront tirées après l'étude plus précise du devenir des cations retenus (compartiments occupés, énergie de rétention entre autres) qui va faire l'objet d'un deuxième article.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FALLAVIER P. (1982). — Dinamica del magnesio en suelos de Palmeras de los Andes (Ecuador). Estudio en columnas de tierra. (*Document interne*, 17 pages).
- [2] OUVRY J. F. (1985). — Etude expérimentale de la dynamique du potassium sur deux sols tropicaux. Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, 254 pages.
- [3] PEDRO G. (1979). — Caractérisation générale des processus de l'altération hydrolytique. *Bulletin AFES*, n°s 2 et 3, p. 93-105.
- [4] VAN RAIJ B., PEECH M. (1972). — Electro-chemical properties of some oxisols and alfisols of the tropics. *Soil Sci. Am. Proc.*, 36, N° 4, p. 587-593.
- [5] SCHACHTSCHABEL P. (1940). — Investigations into the sorption of clay minerals and organic soil colloids on the total sorption of soils. *Kolloid Beiheft*, 51, p. 199-276.
- [6] GOULDING K. W. T. (1983). — Thermodynamics and potassium exchange in soils and clay minerals. *Advances in agronomy*, vol. 36, p. 215-264.
- [7] UDO E. J. (1978). — Thermodynamics of potassium-calcium and magnesium — calcium exchange reactions of kaolinitic soil clay. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, p. 556-560.
- [8] PLEYSIER J. L., JUO A. S. R., HERBILLON A. J. (1979). — Ion exchange equilibria involving aluminum in a kaolinitic ultisol. *Soil Sci. Am. Soc. J.*, vol. 43, p. 875-880.

- [9] SIVASUBRAMANIAN S., TALIBUDEEN O. (1972). — Potassium-aluminium exchange in acid soils. 1. — Kinetics. *J. Soil Sci.*, vol. 23, p. 163-176.
- [10] ORSINI L., REMY J. C. (1976). — Utilisation du chlorure de cobalto-hexamine pour la détermination de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Science du Sol (Bulletin de l'AFES)*, n° 4, p. 269-275.
- [11] FALLAVIER P., BABRE D., BREYSSE M. (1985). — Détermination de la capacité d'échange cationique des sols tropicaux acides. *L'Agronomie Tropicale*, 40-4, p. 298-308.
- [12] FAUCK R. (1974). — Les facteurs et les mécanismes de la pédogenèse dans les sols rouges et jaunes ferrallitiques sur sables et grès en Afrique. *Cah. ORSTOM, Série Pédologie*, vol. XII, n° 1, p. 69-72.
- [13] PRATT P. F., PETERSON F. F., HOLZHEY (1969). — Qualitative mineralogy and chemical properties of a few soils from Sao Paulo, Brazil. *Turrialba*, vol. 49, p. 491-496.
- [14] MORAIS F. I., PAGE A. L., LUND L. J. (1976). — The effect of pH, salt concentration and nature of electrolyte on the charge characteristics of Brazilian tropical soils. *Soil Sci. Am.*, vol. n° 40, p. 521-527.
- [15] UEHARA G., GILLMAN G. (1981). — The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. *Westviews Tropical Agriculture Series*, N° 4, 170 p.
- [16] AMEDEC G., PEECH M. (1976). — The signification of KCl extractable Al as an index to lime requirement of soils of the humid tropics. *Soil Sci.*, 121, N° 4, p. 227-233.
- [17] NALOVIC L., PEDRO G. (1979). — Rôle de l'intervention de microsystèmes concentrés et de la mise en œuvre de conditions fluctuantes au cours des phénomènes d'altération. *Science du Sol (Bull. de l'AFES)* n°s 2 et 3, p. 195-208.

SUMMARY

Experimental study of potassium and magnesium dynamics in a few tropical soils representative of oil palm growing zones.

P. FALLAVIER and J. OLIVIN, *Oléagineux*, 1988, 43, N° 3, p. 93-105.

The dynamics of potassium and magnesium were studied in the laboratory using 15-20 cm earth columns from a few tropical soils representative of oil palm growing zones. Earth columns weighing 2.5 kg from La Mé (Côte d'Ivoire) and Aek Loba (Indonesia) received 2.3 meq/100 g of potassium in KCl form and were then watered for 25 days with a total of 875 mm of water. 17.3 and 46 p. 100 of the potassium applied remained respectively, mainly through exchange with Ca and Mg. In addition, 400 g columns received 1 meq/100 g of potassium or magnesium in chloride form and the equivalent of 714 mm of water were then continuously percolated through them for 92 1/2 hours. In the soils from La Mé, Aek Loba, Aek Kwasan (Indonesia) and Pobé (Bénin), the remaining potassium saturated 30 p. 100 of the CEC. On the soil from Tocache (Peru), 78.1 p. 100 of the magnesium applied remained through exchange with Ca. For the four soils from Ecuador, the slow Mg migration made the drawing up of mineral balances uncertain. Nonetheless, the CEC rate of saturation by magnesium, between 5.2 p. 100 and 22.5 p. 100, was consistent with the agronomical results.

RESUMEN

Estudio experimental de la dinámica del potasio y del magnesio en algunos suelos tropicales representativos de las áreas de cultivo de la palma africana.

P. FALLAVIER y J. OLIVIN, *Oléagineux*, 1988, 43, N° 3, p. 93-105.

La dinámica del potasio y del magnesio se estudia en laboratorio, usando columnas de tierra de 15 a 20 cm, procedentes de algunos suelos tropicales representativos de áreas de cultivo de la palma africana. Columnas de 2,5 kg de suelos de La Mé (Côte d'Ivoire) y Aek Loba (Indonesia), reciben 2,3 me/100 g de potasio bajo la forma de KCl, siendo luego regados durante 25 días, y recibiendo 875 mm de altura de agua. Un 17,3 p. 100 y un 46 p. 100 respectivamente del potasio aportado se halla retenido, principalmente por intercambio con Ca y Mg. Por otro lado, columnas de 400 g reciben 1 me/100 g de potasio o de magnesio bajo la forma de cloruro, y luego se hace percolar el equivalente de 714 mm de agua en forma continua durante 92 h 30 mn. En los suelos de La Mé, Aek Loba y Aek Kwasan (Indonesia) y Pobé (Bénin), el potasio retenido satura un 30 p. 100 de la CIC. En el suelo de Tocache (Perú), un 78,1 p. 100 del magnesio aportado se halla retenido por intercambio con Ca. Para los cuatro suelos del Ecuador, la lenta migración de Mg hace que los balances minerales sean difíciles de establecer. Sin embargo, los porcentajes de saturación de la CIC por el magnesio, que se hallan comprendidos entre un 5,2 p. 100 y un 22,5 p. 100, resultan coherentes con los resultados agronómicos.

Experimental study of potassium and magnesium dynamics in a few tropical soils representative of oil palm growing zones

P. FALLAVIER (1) and J. OLIVIN (2)

INTRODUCTION

Potassium is one of the fundamental nutritive elements for oil palm plant growth and bunch production. Through export and fixations, mean annual yields of 15 tonnes of bunches/ha mobilize about 100 kg of potassium/ha which can often only be covered by applying fertilizers: 70 p. 100 of known field experiments respond to potassium fertilizer, but these responses vary considerably. Hence optimum rates fall between 1.5 and 3.5 kg of KCl/tree/year (220 to 500 kg of KCl/ha/year), whilst yield increases go from 6 to 14 t of bunches/ha per tonne of KCl applied.

Using its experimental network, the IRHO has been able to show that leaf K contents are sensitive to deficiency: below a content of 0.9 p. 100 of the dry weight of leaf no. 17, yields are limited by potassium deficiency. Leaf analysis therefore makes it possible to manage potassium nutrition. On certain soils, however, there are exceptions to the rule: on the plantations in Northern Sumatra, leaf K contents remain close to 0.8 p. 100 despite substantial applications of potassium, i.e. 5 kg/tree/year.

Magnesium deficiency is clearly revealed through leaf analysis. Trials conducted in Ecuador have shown, in particular, very considerable differences in responses to MgCl₂. An earlier study carried out in the laboratory [Fallavier, 1982] stressed the lack of magnesium mobility in soils where no response is obtained.

The aim of this article is to specify potassium and magnesium dynamics in the soil, using a technique which involves the percolation of fertilizing solutions through earth columns. Part of the work described has been discussed in a thesis [Ouvry, 1985].

(1) Director, CIRAD (*) Soil Analysis Laboratory.

(2) IRHO-CIRAD Agronomy Division (*).

(*) CIRAD, B. P. 5035 — 34032 Montpellier Cedex (France).

I. — ALKALINE AND ALKALINO-EARTH CATIONS IN THE SOIL

Schematically, 4 compartments can be distinguished for alkaline and alkaline-earth cations in the soil :

1. — **Mineral cations**, contained in the primary minerals. Through slow alteration (basically through hydrolysis), they are released in the soil solution or incorporated in the neoformed clayey minerals : gibbsite (strong hydrolysis), kaolinite (moderate hydrolysis), montmorillonite (weak hydrolysis) [Pedro, 1979].

2. — **Exchangeable cations**, representing the fraction of the cations available at a given moment. These cations are retained, by electrostatic attraction, on the surface of the mineral and organic colloids of the soil and balance out the negative charges of the latter. The mineral colloid fraction in tropical soils is basically composed of minerals with different charges (minerals 1/1, Fe and Al hydroxides). In other words, the CEC varies depending on the pH and the ionic force of the soil solution [Van Raij, Peech, 1972].

The organic material also contains different charges : its impact becomes apparent when the soil pH exceeds the pKa of the acid groups making it up (approximately 5.5 - 6).

On the absorbing complex, the alkalines, alkalino-earths and cations Al^{+++} , H^+ , Mn^{++} in acid soils compete with each other. Exchanges between cations take place quite easily depending on their radius, valency and concentration. They also depend on the nature of clayey minerals.

As regards kaolinites, the increasing order of selectivity based on the quantity of ions retained is as follows :

$Na < H < K < Mg < Ca$ [according to Schachtschabel, 1940].

For monovalents, Goulding [1983] proposes a different classification based on ion activity : $Na < H < K, NH_4$.

In the case of exchanges between K and Ca or K and Mg, the soil often prefers K [Udo 1978, Pleyrier *et al.*, 1979]. In the case of exchanges between K and Al, the results published are less conclusive. Sivasubramanian and Talibudeen [1972] found that K exchange is preferred as long as it does not saturate the CEC above 30 p. 100.

3. — **The soluble cation form** is often confused with the exchangeable form because exchanges are rapid between these two forms and analysis does not clearly distinguish them.

4. — **The retrograded form** plays a considerable role in potassium dynamics. It can be fixed on the interfolia exchange sites of swelling minerals and trapped in hexagonal cavities by the closing in of the clayey folia.

Retrogradation is a complicated process which basically depends on :

- cation hydration energy : contrary to Ca^{++} , Na^+ , and Mg^{++} , the K^+ ion easily loses its hydration water and this makes it easier for the clayey folia to close together ;

- the size of the hexagonal cavities of clayey minerals : the closing together of folia is facilitated through the correspondence between the size of the cations and the cavities ;

- the density of the charge on clayey folia ;

- the succession of drying and moistening cycles which facilitates the rearrangement of interfolia cations and the closing together of folia.

II. — MATERIAL AND METHOD

1. — **The soils studied** are from IRHO trials (Table I) which show various responses to potassium and magnesium fertilizers. All the samples were taken from the 0-20 cm layer.

The main physico-chemical characteristics are given in Table II. Analysis of the absorbing complex was undertaken using the chloride cobaltihexammine method [Orsini and Remy, 1976], which is better adapted to acid tropical soils than the ammonium acetate method with a pH of 7 [Fallavier *et al.*, 1985]. This leads to lower CECs as it does not take into account the charges developed when pH increases to 7.

Retrograde potassium is evaluated from the difference between the potassium extracted by boiling HNO_3 1 N and exchangeable potassium.

2. — Description of the experiments.

A first series of earth column experiments with discontinuous percolation was carried out. Two different sized columns were used : a model 120 mm in diameter containing about 2.5 kg of earth 15 to 18 cm high depending on soil density and a smaller

model 43 mm in diameter containing about 400 g of earth 20 cm high. The percolating solution was poured in one go over the soil every day for 25 days, using 420 cm³ and 50 cm³ of solution respectively.

All of the columns are made of PVC and fitted with a cock at the bottom. Preparation operations were the same for each size column : a 1-cm layer of quartz (Fontainebleau sand) lies on a prefilter placed at the bottom of the column to ensure drainage and homogeneous percolation throughout the column ; dry soil passed through a 2 mm screen was placed over the quartz in 3-cm layers. Each layer of earth was slightly tamped down using a 200 g weight dropped from a height of 10 cm. A second prefilter was placed on top of the last layer of earth to distribute the solution evenly throughout the column.

Before percolation began, the soil was saturated with distilled water introduced through the cock at the bottom of the column. As soon as the water appeared at the top of the column, the operation was halted. The earth was then left to drain and the gravity water collected and poured into the column again during the first watering.

This process was used for the La Mé and Aek Loba soils. Two treatments were tested : a control and KCl at 2.3 meq/100 g of soil. Two watering frequencies were compared : daily watering and every three days. The 25 waterings correspond to a height of water of 875 mm, i.e. 47 and 38 p. 100 respectively of mean annual rainfall in the areas where the samples were taken. There were two replications per treatment, i.e. four columns of each model with and without KCl for each soil type. 25 percolates were collected for analysis, each corresponding to one of the 25 waterings.

At the end of the experiment, the earth column was removed and cut into 8 slices : the exchangeable cations, pH and CEC were analyzed in each slice. Ouvry [1985] confirmed that on these two soils the watering method (all at once or split) and the watering frequency (daily or every 3 days) do not have a significant effect on the results obtained except for the iron elution.

A second earth column experiment was carried out to develop a method both simple and rapid and capable of being standardized : 43 cm diameter columns, each containing about 400 g of earth, were prepared as above. 1 meq/100 g of K was applied to the LM, AL, AK and PB soils and 1 meq/100 g of Mg was applied to the other 5 soils, i.e. PN, RB, SF, PE and TT. Applications were made in one go using an appropriate volume of 0.05 N solution, i.e. about 80 ml for 400 g of earth. Distilled water was then percolated at the rate of 11.1 ml/hour. Two percolates were collected per column, after 24.5 hours and 92.5 hours respectively. The total quantity of water corresponded to a height of 714 mm. The two percolates and the upper and lower halves of the columns were analyzed.

III. — RESULTS AND DISCUSSION

1. — Mineral inputs through watering (Experiment 1).

The cumulative percolate results (Table III) give mean results for 8 columns receiving KCl. The quantity of ions leached by the KCl application is the difference between the quantities leached in the KCl column and those leached in the control column. Examination of the ion elution curves (Fig. 1 and 2) show that the elution speeds of a given ion are different in the two columns. They are primarily influenced by the ionic force of the solutions. The quantity leached can apparently decrease at the end of the experiment. Hence for AL, the difference between eluted Ca in the KCl and control columns is 773 $\mu eq/100$ g after 5 percolations and falls to 704 $\mu eq/100$ g after 25. This inevitable approximation diminishes when the number of percolations increases ; it remains slight and does not significantly influence the conclusions drawn from these experiments.

The cation/anion balance is respected : for La Mé the cation/anion ratio is 1.04, for Aek Loba 0.90 though NH_4^+ was not analyzed in the latter. Taking the value found in the second experiment, this ratio is 0.95.

The La Mé percolates are coloured : they contain a considerable amount of iron which precipitates as the percolate ages : it varies with the watering method and treatment (Table IV). It is probable that the deferrization tendency of this type of soil [Fauk, 1974] is accentuated as the soil remains saturated and in a reducing environment during the experiment.

The pH of the Aek Loba percolates remain almost neutral, whatever the treatment. For La Mé, the control percolates remain almost neutral whilst in the KCl treatment, the first percolates are

acidic (4.4) and tend towards neutral after the tenth percolation. This variation corresponds to the leaching of aluminium in the first percolates.

Soil analysis results are given in Table V. The results obtained from the control column are considerably different from the initial soil analysis. The percolation using merely water modifies the distribution of exchangeable ions as the pH increases, which favours solubilization of the basic cations and causes the CEC to increase [Pratt *et al.*, 1969 ; Morais *et al.*, 1976].

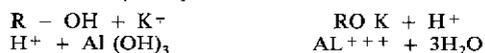
The exchangeable base profiles along the length of the columns (Fig. 3 and 4) show a decrease in exchangeable K^+ with depth, whilst exchangeable Ca^{++} and Mg^{++} are constant (La Mé) or slightly decreasing (Aek Loba). The variability of exchangeable K^+ results mainly from the watering method.

For La Mé, percolate analysis results indicate that 17.3 p. 100 of the K applied is retained by the soil, i.e. 397 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$. This value corresponds to the increase in exchangeable potassium revealed through soil analysis : 380 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$.

The losses in Ca and Mg measured by analyzing the percolates correspond to reductions of their exchangeable form : 233 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of leached Ca for a reduction of 220 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of exchangeable Ca, 83 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of leached Mg for a reduction of 90 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of exchangeable Mg. The role of sodium is very limited. It can be deduced from these concordant results that 85 p. 100 of the potassium retained is exchanged with the Ca, Mg and Na cations.

The KCl treatment, which increases the soil solution's ionic force, can increase the density of negative charges [Uehara, Gillman, 1981]. This is confirmed in all the soils studied here. Although this increase is only slight, it is not negligible when the exchange capacity is low. It may also be the cause of the retention of 40 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of potassium in the La Mé soil.

On the whole, Al^{+++} seems to participate little in the exchanges — the decrease in exchangeable Al is only 20 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ — but it is considerably leached (232 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$) after the dissolution of aluminium components as per the following scheme [Amédée and Peech, 1976] :



where R is any radical, organic or mineral.

In the Aek Loba soil, 46 p. 100 of the potassium applied is retained according to the analysis of the percolates (1,053 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$) whilst the quantity of exchangeable bases indicates that exchangeable potassium increased by 900 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$: 153 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of potassium are retained in non exchangeable form, retrograded in the 2/1 minerals present in trace form [Ouvry, 1985].

The quantities in Mg are consistent : loss of 159 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ according to percolate analysis, reduction of exchangeable Mg by 170 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$.

On the other hand, the Ca is leached more, 704 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, than the exchangeable Ca is reduced, 510 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$. The high total Ca content (14 meq/100 g) suggests that Ca is dissolved during leaching, as does the shape of the elution curve in figure 2.

Potassium exchange can be summarized as follows : 900 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of potassium are retained in exchangeable form, 690 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ are exchanged with Ca, Mg and Na whilst 210 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ are fixed on negative charges appearing after the KCl treatment. In addition, 153 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ are undoubtedly fixed through retrogradation. Out of the 46 p. 100 of K retained, 30 p. 100 are exchanged with Ca and Mg, 7 p. 100 are fixed and 9 p. 100 remain in exchangeable position on electro-negative sites resulting from the KCl treatment. This latter fraction is likely to return very easily to the solution as the reason for its existence disappears through persistent leaching which reduces the ionic force of the soil solution. This observation partly explains why the quantities of cations retained, calculated using the difference between the KCl and control columns, diminish after the 5 th or 6 th percolate.

2. — Continuous leaching (Experiment 2).

Percolate runoff at the bottom of the columns was very regular on all the columns : $11.08 \pm 0.18\text{ ml/hour}$. Applications of K or Mg were 1 meq/100 g for all the soils. The results of percolate and exchangeable bases analyses are given in Tables VI and VII.

For La Mé, the brown coloured percolates contained a considerable amount of iron. Under saturation conditions it is found in $FeOH^{++}$ form [Nalovic, Pedro, 1978]. With a valency of 2 given to iron, the anion/cation balance is verified in the percolates : 1,156 $\mu\text{eq}/100$ of anions, 1,104 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of cations.

Reasoning as before, it can be said that 29.5 p. 100 of the potassium applied is retained (295 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$), but exchangeable K only increased by 255 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, hence there are 40 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of K retained in non-exchangeable form. The reduction of exchangeable Ca and Mg is only 135 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$: almost half of the exchanged K is retained other than through exchange with the cations originally present. It is possible that the leaching of iron (239 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$) creates negative charges capable of retaining K^+ , but the analyses are not conclusive.

Aluminium plays a lesser role than in the first experiment as the KCl concentration is lower. Exchangeable Al is reduced by 70 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ in the upper half of the column and is exchanged again in the lower half where it increases by 60 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$.

The sulphate content in the percolate is considerable : 122 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$. Its appearance in solution is linked to that of iron.

Compared to the first experiment, two differences appear : very considerable leaching of iron and less variation between the exchangeable bases due to less advanced exchange reactions linked to the shorter length of the experiment (3.8 days instead of 25).

For Aek Loba, concordance between the two experiments is good. In the second, 85.4 p. 100 of the potassium is retained, i.e. 854 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$; on the other hand, leaching of the other cations is 694 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$. Soil analysis shows that exchangeable K increases by 675 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, which corresponds to the reduction of exchangeable Ca^+ , Mg^+ and NH_4^+ by 668 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ (with exchangeable NH_4^+ equal to leached NH_4^+).

As in the first experiment, the quantity of magnesium is balanced and it has to be taken that Ca is dissolved since the leached Ca is higher than the reduction of exchangeable Ca. The amount of Ca is dissolved per day is the same in both experiments : 19.3 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ and 19.7 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ respectively (dissolved Ca = leached Ca - exchanged Ca). The non exchangeable potassium retained is 179 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, which comes close to the results of the first experiment (150 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$).

The second Indonesian soil (Aek Kwasan) behaves similarly to that of Aek Loba : 56.2 p. 100 of the K application is retained, i.e. 562 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, 495 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of which is in exchangeable form. The exchange with Ca, Mg and Al corresponds to 450 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$. The rest, 45 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, can be retained either on the variable charges created (though this possibility is less distinct than in the first experiments, since the KCl concentration is lower), or through exchange with NH_4^+ ; in effect, 50 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of NH_4^+ are found in the percolate.

On Pobé soil the results are consistent : 609 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of K are retained (i.e. 60.9 p. 100 of the application) for an increase of 575 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of exchangeable potassium which exactly corresponds to the reduction in exchangeable Ca and Mg. There were 26 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of non-exchangeable fixed K. The percolate contained iron (22 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$) and sulphate (181 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$). The soil had no exchangeable aluminium whilst 12 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of Al were leached ; they come from the dissolving of minerals.

In the other five soils, where Mg was applied, exchanges essentially occur with Ca. Except for the Pueblo Nuevo soil, they do not contain any exchangeable aluminium and exchangeable potassium was modified very little.

In the Peru soil, 78.1 p. 100 of the magnesium applied was retained, i.e. 781 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, 585 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of which are exchangeable with Ca. The exchange with K is negligible : 5 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$. This value is at the sensitivity limit of the analyses.

The 191 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ remaining are undoubtedly fixed on the 2/1 mineral exchange sites present, which are inaccessible to the cobalthexammine ion used to extract exchangeable bases.

The three Ecuador soils of volcanic origin have common characteristics : slow (Rio Blanco) or very slow migration (Tatiana and Shushufindi), seen through differences in exchangeable magnesium contents between the upper and lower halves of the columns ; incomplete chlorine migration at the end of the experiment.

The soil layer results (Table VIII) show that in the upper layer, Mg is essentially exchanged with Ca. For Rio Blanco this exchange continues in the lower layer, whilst for the other two soils at Tatiana and Shushufindi, exchangeable Ca and Mg are increased. Nonetheless, Chlorine contents indicate that the elution of introduced ions is not finished : the Mg which has not yet reacted but is still in the solution is counted as exchangeable Mg and this form is overestimated. Likewise, the lower layer of the two soils is enriched in exchangeable and soluble Ca.

Given the above observations, the following conclusions can be drawn :

For Rio Blanco : 496 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ are retained in the soil when percolation comes to a halt but an unknown fraction is in soluble form. This value is therefore additional to the value which would have been obtained if the experiment had been continued.

Likewise, exchangeable Mg, 410 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$, is found in excess.

The reduction in exchangeable Ca seems to be a more realistic value of exchanged Mg : 355 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$. This leads to Mg retained being situated between 35.5 and 49.6 p. 100 of the application, with the lower value corresponding to exchanged Mg whilst the rest includes soluble Mg and, possibly, retrogradable Mg.

For *Shushufindi*, using the same reasoning on the upper layer, it can be seen that 465 μeq (for 50 g) are exchanged with Ca and K : 704 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ remain in the column. The percentage of retained Mg falls between 46.5 and 70.4 p. 100 of the application. There is a considerable fraction (23.9 p. 100) whose destination is unknown.

For *Tatiana*, 645 $\mu\text{eq}/100\text{ g}$ of Mg are exchanged with Ca, K and Na whilst 781 $\mu\text{eq}/100$ remain in the column. Thus between 64.5 and 78.1 p. 100 of the magnesium applied is retained.

In the *Pueblo Nuevo soil*, which is rich in montmorillonite, the access time required to reach the exchange sites is long. Chlorine is not completely eluted at the end of the experiment. In the upper layer of the column, 315 $\mu\text{eq}/50\text{ g}$ of Mg are exchanged with Ca and K. It appears to come from the aluminium no doubt in solution rather than exchangeable form. The bottom of the column contained Mg and Ca in solution form. There was between 31.5 and 79.4 p. 100 retained Mg, with the latter figure being drawn from analysis of the leached material.

IV. — AGRONOMICAL BEHAVIOUR AND CATION LEACHING — CONCLUSIONS

In the four soils where potassium was applied, it is mainly exchanged with Ca and Mg. Proportionately, Mg is displaced most easily : the exchangeable Mg/exchangeable Ca ratio is divided by a factor between 2 and 2.5.

Expressed in terms of 1 meq/100 g of CEC, the retention of K varies little in these kaolinite, Fe and Al hydroxide soils : going from 24.8 p. 100 for PB to 35.8 p. 100 for AK. These rates are high and it can be understood that deficiencies in potassium are easy to correct. For Aek Loba, KCl applications do not result in

additional K uptake by the plants because the K/Ca ratio remains low [Ouvry, 1985].

Among the soils receiving magnesium, RB, SH and PE revealed a slight Mg deficiency in the field which is easy to correct. Expressed in terms of 1 meq/100 g of CEC, retention varies between 9.7 and 22.5 p. 100 whilst the exchangeable Mg/CEC ratio varies between 0.16 and 0.23. For TT, whose deficiency is very difficult to correct, retention varies between 5.2 and 6.3 p. 100 whilst the exchangeable Mg/CEC ratio is 0.15.

For PN, which is rich in exchangeable Mg and has a high CEC (25.7 meq/100 g), the exchangeable Mg/CEC ratio is 0.45 whilst retention, expressed in terms of meq/100 g of CEC, is only 1.2 to 3.1 p. 100.

Figure 5 shows that the rate of Mg retention per CEC unit decreases when Mg saturation increases.

The *Tatiana* soil is clearly set apart from soils whose deficiency is easy to correct or non-existent.

Moreover, the fixation of applied K occurs, through exchange with Ca and Mg whilst the applied Mg is mainly exchanged with Ca without displacing K.

This phenomenon is perhaps the cause of the aggravating effect of excess potassium fertilizer on the magnesium deficiency, whilst magnesium fertilizer does not induce a potassium deficiency.

Table IX summarizes the results obtained. As to the methods used, the following observations need to be made :

— The column method with daily watering leads to reliable results : the anion/cation balances of the percolates are good, exchange reactions come to a halt after 25 percolations (the cation content is very close to zero). The main disadvantage is that it is lengthy and many analyses have to be carried out.

— The continuous percolation method proved to be less reliable for the types of soils studied here ; after 92 hours, balances were incomplete and it was difficult to obtain consistent results because of a certain number of interfering mechanisms induced by the method : dissolving, soil destructurization, very reducing medium.

More in-depth conclusions will be drawn after further study of what happens to the cations retained (compartments occupied, retention energy, among other things) ; these will be described in a future article.■



AZODRIN 55.2

Insecticide contre les larves mineuses
des feuilles du palmier à huile
(*Coelaenomenodera Elaeidis* MLK)



DES
PRODUITS
POUR
L'INDUSTRIE
ET L'AGRICULTURE

Société Africaine
Shell Chimie