

# L'aluminium échangeable dans les sols acides de quelques pays d'Afrique et de Madagascar<sup>(1)</sup>

Sambath TRINH

Stagiaire aux Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM,  
70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy

## RÉSUMÉ

De l'étude comparée des méthodes d'extraction de l'aluminium échangeable, on déduit que l'extraction par centrifugations successives donne des résultats nettement plus constants que le procédé par percolation sur colonne. Néanmoins, on a préféré un troisième procédé, c'est-à-dire l'extraction par percolation à volume constant. En effet, cette dernière méthode est beaucoup plus maniable et ses résultats sont tout aussi reproductibles que ceux de la méthode par centrifugation.

Les résultats trouvés sur différents échantillons des 8 profils étudiés sont variables. Cette variation dépend essentiellement des valeurs de pH et accessoirement du degré de saturation. On peut extraire de l'aluminium échangeable pour des pH ne dépassant pas 5,1 et des degrés de saturation allant jusqu'à 30 %.

L'aluminium échangeable est en corrélation négative très significative avec le pH, beaucoup plus lâche avec le degré de saturation (pour des échantillons à pH inférieur ou égal à 5,1, et des degrés de saturation inférieurs ou égaux à 30 %).

L'évolution de l'aluminium échangeable à travers profil est à l'inverse de celle du pH. Cette tendance est systématique si on exprime la valeur de l'aluminium échangeable en milliequivalents pour 100 g d'argile.

## ABSTRACT

From the compared study of extraction techniques for exchangeable aluminium, it appears that successive extractions by centrifugation, provides much more steady results than the column percolation process. However, a third process has been preferred, that is to say extraction by constant volume percolation. Indeed, the latter method is

much more handy with results as easy to reproduce as with the centrifuge method.

The results obtained with the different samples of eight profiles are variable. This variation depends mostly on the pH values but secondarily on saturation degree. It is still possible to extract exchangeable aluminium at pHs amounting to 5,1 and saturation degree of 30 %.

Exchangeable aluminium presents a negative correlation both with pH and saturation degree, but very significative with the former and very loose with the latter (with samples having a pH lower than 5,1 and a degree of saturation lower than 30 %).

The evolution of exchangeable aluminium throughout each profile is opposite to that of pH. This trend is systematic if one calculates the aluminium as milliequivalent for 100 g of clay.

## PLAN

1. INTRODUCTION
2. MATÉRIAUX
3. ETUDE MÉTHODOLOGIQUE
  - 3.1. Dosage de l'aluminium dans les extraits salins
  - 3.2. Comparaison des méthodes d'extraction d'aluminium échangeable
  - 3.3. Efficacité d'extraction suivant le pH de la solution de chlorure de potassium molaire
4. RÉSULTATS
  - 4.1. L'aluminium échangeable dans les différents sols
  - 4.2. L'aluminium échangeable dans les différents échantillons
  - 4.3. Evolution de pH, de degré de saturation et d'aluminium échangeable dans le profil
5. CONCLUSION
6. BIBLIOGRAPHIE

(1) Ce travail est extrait d'une thèse de 3<sup>e</sup> cycle présentée en 1976 à l'Université de PARIS VI.

## 1. INTRODUCTION

L'aluminium peut être pris comme un élément de référence pour l'étude d'un sol aussi bien que le fer et le silicium, puisque la grande majorité des sols des diverses régions du globe en sont largement pourvus (Jackson, 1963). La teneur en aluminium du sol est d'autant plus élevée que le climat est plus chaud (Volobuyev, 1962).

Dans le sol, on peut trouver l'aluminium sous quatre formes principales : les constituants cristallins (minéraux argileux), les constituants amorphes (hydroxydes, oxydes, silicates alumineux), les constituants adsorbés plus ou moins fortement sur les complexes ( $Al^{+++}$ ,  $Al(OH)^{++}$ ,  $Al(OH)^{+2}$ ) et les constituants incorporés ou chélatés dans la matière organique.

Dans cet article, seul l'aluminium échangeable adsorbé sur le complexe est étudié.

L'étude de cette forme d'aluminium dans le sol a été faite depuis longtemps par de nombreux auteurs ; mais elle porte surtout sur des sols des régions tempérées et très peu sur des sols des pays chauds.

C'est la raison pour laquelle ce travail ne s'effectue que sur les sols des pays chauds d'Afrique Occidentale et de Madagascar.

Une grande partie de cet article est consacrée à la recherche d'une méthode adaptée à ces sols. Les parties suivantes concernent l'interprétation des résultats, c'est-à-dire qu'on verra d'abord les valeurs d'aluminium échangeable dans les échantillons, ensuite les relations que peuvent avoir l'aluminium échangeable avec le pH et le degré de saturation, et on terminera par la vérification du rôle de l'aluminium échangeable dans la réaction du sol.

## 2. MATÉRIAUX

Le choix des échantillons est basé sur trois critères : le pays d'origine, le pH et le degré de saturation. Les profils choisis proviennent tous des pays d'Afrique Noire et de Madagascar (1). Le pH de ces sols varie de 4,2 à 6,5 et le degré de saturation de 4 à plus de 80 %.

(1) Ces échantillons proviennent des réserves des S.S.C. de l'ORSTOM à Bondy. Ils ont été prélevés par R. Boulet, R. Maignien, A. Perraud.

Il y a en tout 44 échantillons répartis en 8 profils qui sont décrits ci-dessous avec un tableau récapitulatif des résultats d'analyse courante (tableau I) :

### Profil YAPO 1 :

Sol ferrallitique fortement désaturé, remanié, jaune sur schiste arkosique.

Origine de YAPO-SUD (Côte d'Ivoire) ; géomorphologie : paysage ondulé, pente 16 % ; forêt dense et humide ; température : 27 °C ; pluie : 1 900 mm.

0-10 cm :

— Gris beige ; sableux ; polyédrique fine émoussée.

à 50 cm :

— Jaune ; sablo-argileux ; polyédrique grossière.

à 80 cm :

— Jaune ; argilo-sableux ; polyédrique ; taches beiges ; cailloux de quartz dans la partie inférieure.

à 100 cm :

— Mêmes caractéristiques avec de plus en plus de taches rouges.

à 140 cm :

— Tacheté ; argilo-sableux ; 60 % d'éléments grossiers,

à 180 cm :

— Schiste altéré.

Echantillons prélevés dans chaque horizon : YAPO 1-1 ; YAPO 1-2 ; YAPO 1-3 ; YAPO 1-4 ; et YAPO 1-5.

### Profil SAKOTA 1 :

Sol faiblement ferrallitique hydromorphe sur roche métamorphique granitique

Origine : Côte d'Ivoire.

0 à 10 cm :

— Gris ; sableuse ; particulière ; quelques gravillons.

à 40 cm :

— Beige ; sableux ; particulière ; quelques cailloux de quartz.

à 70 cm :

— Gravier et gravillons ; enrobement sableux.

à 120 cm :

— Rougeâtre ; argilo-sableux ; taches claires ; polyédrique fine.

à 200 cm :

— Argile tachetée ; compact ; bariolée.

à 300 cm :

— Horizon de transition.

à plus de 350 cm :

— Altération de granite.

Echantillons :

SAK 1-1 (0 à 10 cm), SAK 1-2 (20 à 30 cm).

SAK 1-3 (100 à 110 cm), SAK 1-4 (150 à 160 cm).

SAK 1-5 (220 à 240 cm), SAK 1-6 (250 à 300 cm).

TABLEAU I. — Résultats d'analyse des échantillons :  
(K = kaolinite; M = montmorillonite; mH = métahalloysite; Gi = gibbsite; I = illite)

ECHANTILLONS	GRANULOMETRIE					pH	S	T	S <sub>200</sub> T	MINERALOGIE
	A	L.F.	L.G.	S.F.	S.G.					
RM 2-1	635	18,5	5,6	1,1	22	4,3	065	17,6	4	----
RM 2-2	650	18,5	5,3	1,2	19	4,5	065	16,4	4	K + Gi
RM 2-3	380	18,0	10,0	25,5	30	4,3	040	10,4	4	K + Gi
RM 2-4	500	27,0	12,4	4,3	4,6	4,4	040	7,2	6	K + Gi
RM 2-5	260	32,5	14,3	6,6	19,4	4,6	050	5,8	9	K + Gi
RM 7-1	11,5	20,5	10,5	25,4	27,5	5,8	4,35	8,75	50	K + un peu mH
RM 7-2	40	15,0	16,0	34,3	28,0	5,7	2,85	6,50	44	K + un peu mH
RM 7-3	120	19,0	14,0	22,7	30,3	5,5	2,90	3,60	81	K + un peu mH
RM 7-4	150	27,0	8,5	10,0	38,2	5,6	3,10	3,25	95	K + un peu mH
RM 7-5	12,5	14,0	5,5	9,5	57,3	6,3	2,40	2,50	96	K + mH + Trace I
RM 12-1	15,5	5,0	5,5	18,2	53,7	5,7	6,15	10,1	61	mH + K
RM 12-2	19,0	5,0	5,0	16,5	52,6	5,6	5,95	6,7	89	mH + K
RM 12-3	20,0	3,0	4,5	14,2	56,5	5,7	7,20	9,1	80	mH + K
RM 12-4	20,5	4,5	4,0	13,4	55,3	5,9	8,65	9,0	96	mH + K
RM 12-5	20,0	4,5	4,5	15,5	53,4	6,0	8,85	13,2	67	mH + K + un peu M
VB 19-1	240	9,5	4,1	26,3	31,4	6,4	8,67	14,0	62	K + mH + Trace I
VB 19-2	29,5	7,5	3,1	22,9	33,5	6,0	5,06	10,5	48	" " "
VB 19-3	47,0	5,5	3,1	16,4	25,5	5,3	3,61	8,0	45	" " "
VB 19-4	53,0	7,0	2,7	11,0	25,1	5,4	3,16	8,5	37	" " "
VB 19-5	33,0	8,5	4,3	15,0	38,3	5,3	=	-	-	" " "
VB 19-6	44,0	10,5	4,7	13,5	26,0	5,1	2,56	3,0	47	" " "
VB 19-7	28,0	15,0	8,5	18,0	29,6	4,7	1,76	5,5	40	" " "
VB 19-8	6,5	10,5	4,7	21,0	56,9	4,5	1,03	4,5	69	" " "
CIA 4-1	9,5	4,5	6,2	32,3	45,5	6,3	3,15	5,2	61	-----
CIA 4-2	27,5	7,0	6,5	17,8	38,6	5,1	0,66	5,2	13	K + Trace I
CIA 4-3	22,0	7,0	4,9	20,0	44,5	5,1	0,65	4,7	14	" "
CIA 4-4	17,5	7,0	4,4	17,8	51,9	4,9	0,45	5,0	9	" "
CIA 4-5	27,0	13,0	7,3	19,1	31,5	5,1	1,07	4,6	23	" "
OY 16-1	24,0	6,5	5,0	42,5	18,4	6,1	4,60	9,0	51	K + un peu Hé
OY 16-2	39,5	7,0	6,5	28,5	15,5	5,1	1,85	7,8	24	K + un peu Gi
OY 16-3	52,0	1,5	3,5	26,5	14,1	4,8	0,58	7,2	8	K + un peu Gi
OY 16-4	49,5	5,5	4,0	25,5	13,1	4,9	0,24	5,5	4	K + un peu Gi
OY 16-5	50,0	7,0	6,5	21,5	12,7	5,0	0,57	5,3	11	K + un peu Gi
YAPOI-1	19,0	7,5	16,5	30,0	21,2	4,1	1,67	11,8	14	K + Trace I
YAPOI-2	26,0	6,5	19,5	21,0	24,3	4,1	0,48	7,4	7	" "
YAPOI-3	41,0	8,0	10,0	13,5	24,7	4,3	0,36	7,3	5	" "
YAPOI-4	46,5	13,5	10,5	12,0	14,6	4,6	0,60	6,5	9	" "
YAPOI-5	38,5	29,5	13,5	10,5	6,0	4,5	0,76	6,5	12	" "
SAK 1-1	11,0	8,5	12,5	29,0	34,3	6,3	8,15	10,2	80	K + un peu I
SAK 1-2	11,5	8,5	11,0	34,0	33,4	5,0	1,84	4,0	47	K + un peu I
SAK 1-3	47,5	9,0	9,0	14,0	18,4	4,7	2,30	7,1	30	K + un peu I
SAK 1-4	52,0	10,5	7,0	15,0	13,3	4,4	1,46	7,1	21	K + un peu I
SAK 1-5	29,0	17,5	10,5	18,5	23,1	4,2	0,87	4,8	18	K + un peu I
SAK 1-6	25,0	19,0	11,5	16,0	27,2	4,0	0,49	4,8	10	K + un peu I

**Profil CIA 4 :**

Sol ferrugineux appauvri à pseudo-gley en profondeur sur granite à biotite et amphibole.

Origine : Odienne (Côte d'Ivoire); entaille de thalweg; savane arbustive; température 26 °C; pluie : 1 626 mm.

0 à 18 cm :

— Gris-brun clair; sableuse; polyédrique peu développée.

à 40 cm :

— Brun clair; sablo-argileuse; polyédrique moyenne.

à 88 cm :

— Légèrement induré; ocre avec taches claires de feldspath friable; sablo-argileuse; polyédrique moyenne.

à 120 cm :

— Induré avec pénétrations terreuses beiges.

à plus de 120 cm :

— Induré; ocre; riche en feldspath; revêtement argileux gris.

Echantillons :

CIA4-1 (5 à 15 cm); CIA4-2 (25 à 35 cm).

CIA4-3 (60 à 70 cm); CIA4-4 (100 à 110 cm).

CIA4-5 (100 à 200 cm).

**Profil OY 16 :**

Sol ferrallitique fortement désaturé typique, faiblement appauvri, sur granite à muscovite.

Origine : RCA (6°18' N - 18°52' E); pente 1,5 % ouest à 150 m de marigot; savane arbustive; température : 25 °C; pluie : 1 410,5 mm.

0 à 12 cm : 5 YR 4/4

— Argilo-sableuse; nuciforme à grumeleuse.

à 29 cm : 2,5 YR 4/6

— Argileuse; polyédrique grossière.

à 260 cm : 2,5 YR 4/6

— Argileuse à éléments très fins; polyédrique faiblement développée.

à plus de 360 cm :

— Rouge vif; rares gravillons; argileuse.

Echantillons :

OY 16-1 (0 à 10 cm); OY 16-2 (15 à 25 cm).

OY 16-3 (50 à 60 cm); OY 16-4 (150 à 180 cm).

OY 16-5 (300 à 320 cm).

**Profil VB 19 :**

Sol rouge faiblement ferrallitique remanié, jaune sur micaschiste amphibolitique.

Origine : RCA (6°52' N - 18°34' E); replat près d'un escarpement cuirassé; savane arbustive; température : 25 °C; pluie : 1 463 mm.

0 à 10 cm :

— Brun-rouge foncé; argilo-sableuse; polyédrique émoussée.

à 21 cm :

— Rouge foncé; argilo-sableuse; polyédrique grossière.

à 50 cm :

— Rouge foncé; argileuse; même structure.

à 101 cm :

— Rouge foncé; gravillons à remplissage argileux; polyédrique moyenne.

à 203 cm :

— Rouge; même texture; débris de micaschiste; même structure.

à 290 cm :

— Rouge vif; argileuse; débris de micaschiste; même structure.

à 400 cm :

— Rouge vif; argilo-sableuse; micaschiste; texture peu développée.

à plus de 510 cm :

— Roche-mère altérée.

Echantillons dans chaque horizon :

VB 19-1, VB 19-2, VB 19-3, VB 19-4, VB 19-5, VB 19-6, VB 19-7, VB 19-8.

**Profil RM 7 :**

Sol rouge faiblement ferrallitique sur gneiss.

Origine : Ankaramena (Madagascar); léger replat à pente de 15 % dominée par une colline avec éboulis rocheux; prairie; pluie; 900 mm.

0 à 10 cm :

— Brun rougeâtre; sablo-limoneuse; quelques cailloux de quartz; grumeleuse.

à 30-40 cm :

— Rouge-brun clair; argilo-sableuse; prismatique grossière.

à 60-70 cm :

— Rouge; argilo-sableuse; polyédrique assez grossière.

à 200 cm :

— Rouge; quelques arènes blancs; argilo-sableuse; polyédrique; tassé.

Plus de 200 cm :

— Passage progressif et hétérogène à arène blanc grisâtre.

Echantillons :

RM7-1 (0-10 cm); RM7-2 (15 à 25 cm); RM7-3 (50-60 cm); RM7-4 (100-120 cm); RM7-5 (200-220 cm).

**Profil RM 2 :**

Sol brun ferrallitique sur basalte.

Origine d'Ankaratra (Madagascar); doucement vallonnée avec pente de 5 à 10 %; prairies et

peuplement de mimosas ; température : 15 °C ; pluie : 1 998 mm.

0 à 12 cm :

— Brun-gris ; argileuse ; grumeleuse.

à 28-30 cm :

— Brun-rouge grisâtre ; limono-argileuse ; polyédrique grossière.

à 70-90 cm :

— Brun-rouge ; argilo-limoneuse ; quelques débris de basalte nuciforme angulaire.

à 130 cm :

— Brun ; argileuse ; graviers de basalte ; prismatique. Plus de 130 cm, basalte altéré.

Echantillons :

RM2-1 (0-10 cm) ; RM2-2 (15-20 cm) ; RM2-3 (40-60 cm) ; RM2-4 (100-120 cm) ; RM2-5 (140-160 cm).

### Profil RM 12 :

Sol ferrugineux tropical peu lessivé à teneur constante en sesquioxydes de fer sur grès.

Origine : Marecrano (Madagascar) ; ravine d'érosion avec pente de 3 % ; savane herbacée ; température : 24-25 °C ; pluie : 600 mm.

0 à 20 cm :

— Brun-rouge grisâtre ; sablo-argileuse ; légèrement feuilletée.

à 45 cm :

— Roux ; sablo-argileuse ; nuciforme.

à 105 cm :

— Roux ; sableuse ; nuciforme ; pseudo-sable.

à 145 cm :

— Rouge ; taches diffuses grisâtres ; structure : sableuse peu développée.

à plus de 250 cm :

— Bariolé ; sableuse avec cailloutis de quartz ; faiblement argileuse.

Echantillons :

RM 12-1 (10-20 cm) ; RM 12-2 (30-40 cm) ; RM 12-3 (50-70 cm) ; RM 12-4 (120-140 cm) ; RM 12-5 (200-220 cm).

## 3. ÉTUDE MÉTHODOLOGIQUE

Le principe sur lequel s'appuient les méthodes d'extraction de l'aluminium échangeable, est la substitution de ce dernier par des cations qui sont, dans le cas présent, du potassium (sous forme de KCl, inspiré de McLean, 1958 et de Blanchet *et al.*, 1960).

Mais l'extraction de l'aluminium échangeable par percolation d'une solution de chlorure de potassium

normale, soustrait en même temps les produits alumineux amorphes et cristallisés peu solubles.

Pour distinguer l'aluminium échangeable des autres produits alumineux peu solubles, on a recouru à la méthode de détermination suivante qui est inspirée à celle de Fried et Shapiro (1956) : on procède à des extractions successives de l'échantillon par la solution de chlorure de potassium normale ; on dresse ensuite la courbe cumulative de la valeur de l'aluminium trouvée dans les fractions du liquide filtré. On obtient ainsi une courbe dont l'allure est celle indiquée par la figure 1 : l'aluminium échangeable correspond à la valeur OP. La valeur PQ correspond à la dissolution des produits alumineux peu solubles après N fractions.

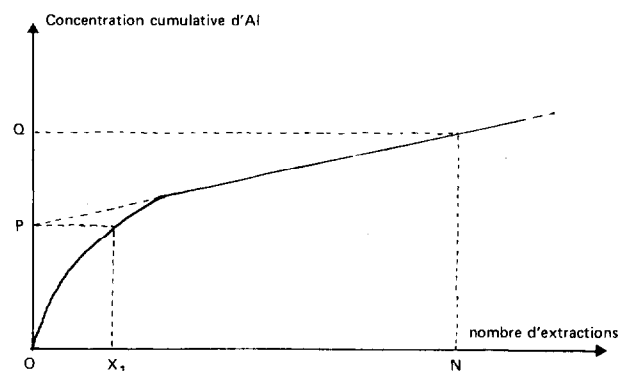


FIG. 1. — Courbe cumulative d'Al dans les extraits successifs de l'échantillon par une solution saline.

### 3.1. Dosage de l'aluminium dans les extraits salins

Il existe deux possibilités pour le dosage de l'aluminium dans une solution : soit par colorimétrie, soit par titrimétrie (Low, 1955 et Little, 1964). La première méthode est très séduisante par sa maniabilité, et cela d'autant plus que l'analyse peut être effectuée automatiquement par l'auto-analyseur.

Quant à la précision, le tableau II montre que les résultats concordent bien entre ces deux méthodes.

TABLEAU II  
Comparaison des méthodes de dosage de l'aluminium dans les extraits salins

	OY 16-3	SAK 1-3	SAK 1-4	YAPO 1-4
Titrimétrie . . . . .	1,230	0,657	1,485	2,052
Colorimétrie . . . . .	1,230	0,600	1,725	2,130

Après cette étude comparée, on a adopté finalement le dosage par colorimétrie à l'ériochrome cyanine dans un milieu tamponné à pH 6,3 (Charlot, 1961), effectué par l'intermédiaire de l'auto-analyseur (le montage de l'appareil est décrit par Dabin, 1966).

### 3.2. Comparaison des méthodes d'extraction de l'aluminium échangeable.

Nous avons effectué une comparaison de trois méthodes, dont deux sont fournies par la littérature (la percolation sur colonne et l'extraction par centrifugation). Les essais faits par ces deux procédés nous ont conduit à préconiser la troisième méthode que nous avons appelée la percolation à volume constant.

#### MÉTHODE À PERCOLATION SUR COLONNE

Elle est inspirée du procédé d'extraction des bases échangeables décrit par Pelloux (1963). Elle consiste à percoler à travers une colonne de terre, une solution saline ; et à recueillir des extraits par fractions de 10 ml, à raison de 15 fractions toutes les trois heures, jusqu'à la fin de l'extraction.

#### MÉTHODE D'EXTRACTION PAR CENTRIFUGATION

Elle est inspirée des travaux de Skeen et Sumner (1965). La manipulation se fait par séries de 8 échantillons. On part de 5 g d'échantillon que l'on met dans des tubes de centrifugeuse de 100 ml. On y

ajoute 50 ml de solution saline. On bouche les tubes et on agite pendant une minute au mixer automatique. On les passe ensuite à la centrifugation pendant cinq minutes à 3 000 tr/mn. On verse le liquide surnageant dans une burette graduée de 50 ml pour estimer la quantité de liquide restée avec le culot, avant de le conserver pour le dosage, dans un flacon en plastique de 50 ml. On rajoute 50 ml de solution saline dans le tube de centrifugeuse, on agite, on centrifuge et ainsi de suite, comme précédemment. On répète ainsi 10 à 15 fois, jusqu'à l'élimination complète de l'aluminium extractible.

Les essais sont faits sur 4 échantillons dont chacun est soumis à 4 répétitions. Les résultats figurent dans le tableau III où l'on voit que la méthode par centrifugation donne des valeurs très constantes, avec des erreurs relatives inférieures à 2,5 %. Les erreurs élevées de la percolation sur colonne sont dues à la circulation préférentielle le long des parois et également au mauvais contact entre le liquide et le sol en raison de bulles d'air.

#### MÉTHODE PAR PERCOLATION À VOLUME CONSTANT

La méthode d'extraction par centrifugation est satisfaisante au point de vue fidélité. Mais on a pensé à la percolation à volume constant qui s'avère plus maniable tout en donnant d'aussi fidèles résultats. Le procédé consiste à prendre 5 à 10 g de sol qu'on met dans un flacon plastique de 100 ml muni d'un bouchon. On y ajoute 50 ml de solution saline avec un peu de pâte de cellulose. On agite mécaniquement pendant 30 mn. On filtre sur du

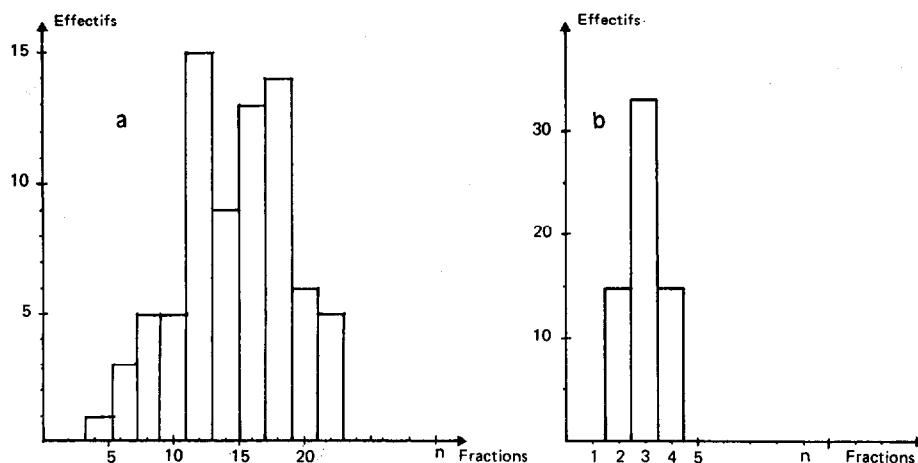


FIG. 2. — Répartition des échantillons ayant l'Al échangeable au nième fraction de l'extraction.  
a) Méthode sur colonne;  
b) Méthode par centrifugation.

papier bleu. Le filtrat est recueilli dans une fiole jaugée de 150 ml. On complète le volume de 150 ml avec la solution saline en continuant la percolation et en lavant le flacon plastique. L'opération de percolation doit durer à peu près 3 heures.

L'idée de cette méthode dérive de deux constatations faites sur les deux premiers procédés d'extraction. En effet, si on relève les effectifs des échantil-

lons présentant la valeur d'aluminium échangeable à la valeur cumulative de la  $x^{\text{ème}}$  fraction, on obtient les répartitions représentées sur les figures 2a pour la percolation sur colonne, et 2b pour l'extraction par centrifugation. On voit que la valeur cumulative correspond à l'aluminium échangeable se trouve autour de la 15<sup>e</sup> fraction pour la figure 2a, et de la 3<sup>e</sup> fraction pour la figure 2b. Ce qui

TABLEAU III

Fidélité des méthodes d'extraction d'Al échangeable

Echantillons .....	OY 16-3	SAK 1-3	SAK 1-4	YAPO 1-4	
Répétition 1 .....	0,47	0,49	1,43	1,79	MÉTHODE SUR COLONNE
Répétition 2 .....	0,45	0,46	1,19	1,63	
Répétition 3 .....	0,49	0,55	1,44	1,88	
Répétition 4 .....	0,47	0,62	1,56	1,93	
Moyennes .....	0,47	0,53	1,40	1,81	
Erreur relative (%) .....	2,4	10,2	5,6	5,4	
Echantillons .....	OY 16-3	SAK 1-3	SAK 1-4	YAPO 1-4	
Répétition 1 .....	1,10	0,54	1,35	2,25	MÉTHODE PAR CENTRIFUGATION
Répétition 2 .....	1,13	0,58	1,33	2,23	
Répétition 3 .....	1,11	0,55	1,32	2,22	
Répétition 4 .....	1,03	0,51	1,32	2,19	
Moyennes .....	1,09	0,54	1,33	2,22	
Erreur relative (%) .....	2,9	3,1	1,3	0,9	
Echantillons .....	OY 16-3	SAK 1-3	SAK 1-4	YAPO 1-4	
Répétition 1 .....	1,29	0,70	1,65	2,05	MÉTHODE A VOLUME CONSTANT
Répétition 2 .....	1,29	0,72	1,62	2,04	
Répétition 3 .....	1,26	0,72	1,62	2,07	
Répétition 4 .....	1,20	0,72	1,62	2,02	
Moyennes .....	1,26	0,72	1,63	2,05	
Erreur relative (%) .....	2,4	0,7	0,5	0,7	

correspond à peu près à un volume de solution de percolation saline de 150 ml.

Au point de vue précision, la méthode d'extraction à volume constant donne des valeurs aussi bonnes que celle par centrifugation, comme l'indique le tableau III.

### 3.3. Efficacité d'extraction suivant le pH de la solution d'extraction (KCl, N)

La solution d'extraction de chlorure de potassium normal est amenée au pH voulu par addition d'acide chlorhydrique dilué. Le pH varie de 6,5 à 3. La diminution de pH est de 0,5 unité environ pour chaque solution. Les solutions ne sont pas tamponnées. La méthode d'extraction est celle de la percolation à volume constant.

Les essais sont faits sur 8 échantillons et les résultats sont portés sur un graphique représentant l'aluminium extrait en fonction du pH de la solution saline d'extraction (fig. 3). On voit que l'aluminium extrait augmente progressivement, mais très légèrement, quand on diminue le pH de la solution

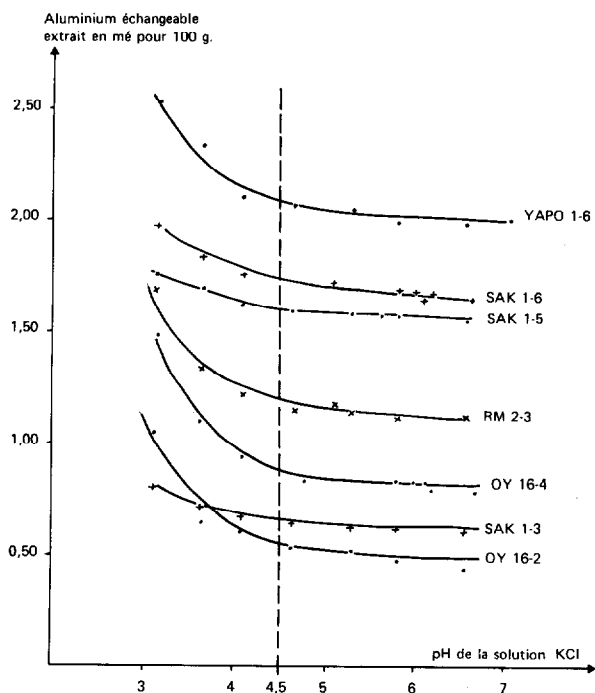


FIG. 3. — Courbes de l'extraction de l'Al échangeable suivant le pH de KCl (N).

d'extraction de 6,5 à 4,5 environ. Mais lorsque le pH diminue au-delà de 4,5, l'aluminium extrait augmente très brusquement. Cette constatation rejoint les observations de nombreux auteurs (McLean *et al.*, 1958, 1969 ; Pratt et Bair, 1961 ; Segalen et Leal Silva, 1969 ; Hussein, 1970 ; Segalen, 1973, etc.).

Cet essai permet donc d'estimer la variation de l'aluminium extrait suivant le pH de la solution d'extraction. La différence moyenne des valeurs d'aluminium extrait entre le pH 4,5 et 6,5 est de 5,3 % de la valeur de pH 4,5.

On ne commet donc pas d'erreur très importante si on fait l'extraction avec une solution saline non ajustée, c'est-à-dire à pH voisin de 6,5. C'est ce qu'on a adopté pour la suite de l'expérience.

## 4. RÉSULTATS

### 4.1. L'aluminium échangeable dans les différents sols

Les résultats d'aluminium échangeables des différents sols figurent dans le tableau IV.

On peut observer d'abord qu'il y a un groupe de profils (VB 19, RM 7 et RM 12) dont les horizons sont dépourvus d'aluminium échangeable. Les échantillons de ces profils ont en commun les caractéristiques suivantes : les valeurs du pH et le degré de saturation sont relativement élevés ( $\text{pH} > 5$  et  $V > 30\%$ ). Dans la fraction argileuse, on note la présence de la métahalloysite à côté de la kaolinite.

Quant aux autres profils (CIA 4, RM 2, SAK 1, YAPO 1 et OY 16), ils présentent des horizons plus ou moins riches en aluminium échangeable. Très souvent, les horizons humifères (pH et V relativement élevés) ne contiennent pas d'aluminium échangeable. Ces profils ont des valeurs de pH et de V plus faibles que le groupe précédent ( $\text{pH} \leq 5$  et  $V \leq 30\%$ ). Dans la fraction argileuse, on ne décele que de la kaolinite, parfois de la gibbsite, mais jamais de métahalloysite.

### 4.2. L'aluminium échangeable dans les différents échantillons

Parmi les 44 échantillons étudiés, 21 seulement contiennent de l'aluminium échangeable. Et parmi



TABLEAU IV

Tableau récapitulatif des résultats d'ensemble

Echantillons	Argile %	pH	V %	T. mé/100 g	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	Al échang. mé/100 g	Analyses Minérales
CIA 4-1 .....	9	6,3	61	5,20	2,07	0	K +I (trace)
CIA 4-2 .....	27	5,1	13	5,20	2,08	1,27	
CIA 4-3 .....	22	5,1	14	4,75	2,05	0,72	K +trace I
CIA 4-4 .....	17	4,9	9	5,00	2,00	0,52	
CIA 4-5 .....	27	5,1	23	4,60	2,04	0,30	K +trace I
VB 19-1 .....	24	6,4	62	14,00	—	0	K +mH +trace
VB 19-2 .....	29	6,0	48	10,50	—	0	
VB 19-3 .....	47	5,3	45	8,00	—	0	
VB 19-4 .....	53	5,4	37	8,50	1,86	0	K +mH +trace I
VB 19-5 .....	33	5,3	78	—	—	0	
VB 19-6 .....	44	5,1	47	3,00	—	0	
VB 19-7 .....	28	4,7	40	5,50	—	0	
VB 19-8 .....	6	4,5	79	4,50	—	0	
RM 2-1 .....	63	4,3	4	17,60	1,19	—	K +Gi
RM 2-2 .....	65	4,5	4	16,45	1,25	1,65	
RM 2-3 .....	38	4,3	4	10,40	1,24	1,22	K +Gi
RM 2-4 .....	50	4,4	6	7,20	1,45	1,04	
RM 2-5 .....	26	4,6	9	5,85	1,57	0,77	K +Gi
RM 7-1 .....	11	5,8	50	8,75	1,92	0	K +mH
RM 7-2 .....	4	5,7	44	6,50	1,86	0	K +mH +trace I
RM 7-3 .....	12	5,5	81	3,60	1,95	0	
RM 7-4 .....	15	5,6	95	3,25	2,21	0	K +mH +trace I
RM 7-5 .....	12	6,3	96	2,50	2,43	0	
SAK 1-1 .....	11	6,3	80	10,25	2,66	0	K +trace I
SAK 1-2 .....	11,5	5,0	47	3,89	3,20	Trace	
SAK 1-3 .....	47,5	4,7	30	7,61	2,03	0,65	K +trace I
SAK 1-4 .....	52	4,4	21	7,08	2,03	1,55	
SAK 1-5 .....	29	4,2	18	4,76	2,00	1,66	K +trace I
SAK 1-6 .....	25	4,0	10	4,80	2,03	1,65	
YAPO 1-1 .....	19	4,1	14	11,83	2,91	2,02	K +trace I
YAPO 1-2 .....	26	4,1	7	7,37	2,79	2,06	
YAPO 1-3 .....	41	4,3	5	7,35	2,12	1,89	K +trace I
YAPO 1-4 .....	46,5	4,6	9	6,48	1,82	2,13	
YAPO 1-5 .....	38,5	4,5	12	6,50	2,15	2,04	K +trace I
OY 16-1 .....	24	6,1	51	9,00	—	—	
OY 16-2 .....	39	5,1	24	7,85	—	0,66	K +un peu Gi
OY 16-3 .....	52	4,8	8	7,25	1,48	1,10	
OY 16-4 .....	49	4,9	4	5,50	—	0,85	K +un peu Gi
OY 16-5 .....	50	5,0	11	5,35	1,52	0,61	
RM 12-1 .....	15	5,7	61	2,44	2,44	0	mH +K +I (tr.)
RM 12-2 .....	19	5,6	89	2,80	2,80	0	
RM 12-3 .....	20	5,7	80	2,60	2,66	0	mH +K +I
RM 12-4 .....	20	5,9	96	2,89	2,89	0	
RM 12-5 .....	20	6,0	67	3,15	3,15	0	mH +un peu Mont.

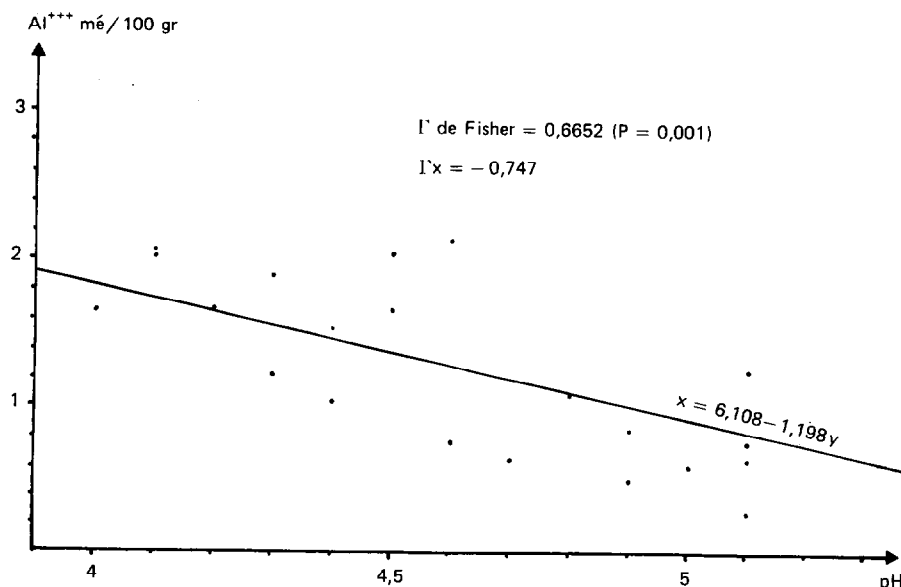


FIG. 4. — Corrélation aluminium échangeable et pH du sol.

ces 21 échantillons, la teneur en aluminium échangeable est variable selon le pH et l'état de degré de saturation.

L'aluminium échangeable peut se manifester dans les milieux ayant des pH s'élevant jusqu'à 5,1. La teneur diminue quand le pH augmente de 4 à 5,1. En effet, le calcul de corrélation de Fischer effectué sur ces 21 échantillons, a montré une corrélation négative et très significative entre le pH du sol et la teneur en aluminium échangeable (fig. 4).

Pour ce qui concerne le degré de saturation, on peut extraire de l'aluminium échangeable sur des échantillons ayant des valeurs de V au maximum égales à 30 %. La teneur en aluminium échangeable tend également à diminuer quand V augmente vers cette valeur limite. Le calcul de corrélation donne une valeur toujours négative, mais très peu significative, au seuil de probabilité de 10 %.

La faible corrélation entre l'aluminium échangeable et V est due également au fait qu'il n'y a pas de corrélation entre le pH et V (Deckers, Vans Tallen, 1955 ; Blanchet, 1960). Le calcul effectué sur les 21 échantillons, donne une corrélation positive, mais non significative ( $r_s = +0,286$ ) ; étant donné que le pH et V sont tous les deux en corrélation négative avec l'aluminium échangeable, s'ils évoluent dans le sens contraire l'un de l'autre, leur action sur l'aluminium échangeable est affaiblie. Et comme la corrélation pH-Al échangeable est plus

significative que celle de V-Al échangeable, l'action antagoniste du pH sur V est plus forte que l'action inverse.

#### 4.3. Evolution du pH, de V et de l'aluminium échangeable dans le profil

La courbe qui décrit l'évolution de l'aluminium échangeable à travers le profil doit être à l'inverse de celle du pH, comme c'est le cas du profil SAK 1 (fig. 5).

Dans certains profils comme YAPO 1 (fig. 5), les deux courbes ne respectent pas les règles de corrélation trouvées plus haut, même si on tient compte de l'interaction négative possible de V. On a pensé dans ce cas, au facteur de la richesse en argile du milieu. En effet, pour tenir compte de ce dernier facteur, on convertit les valeurs de l'aluminium échangeable (exprimées en mé/100 g de sol) en milliéquivalents pour 100 g d'argile. Et, en suivant cette nouvelle valeur à travers le profil, on remarque que l'allure de la courbe du profil SAK 1 (fig. 5) n'a pas changé, alors que celle de YAPO 1 (fig. 5) retrouve une allure conforme aux corrélations trouvées plus haut.

On peut donc dire que le pH reflète plus la richesse en aluminium échangeable des argiles que celle de l'échantillon lui-même.

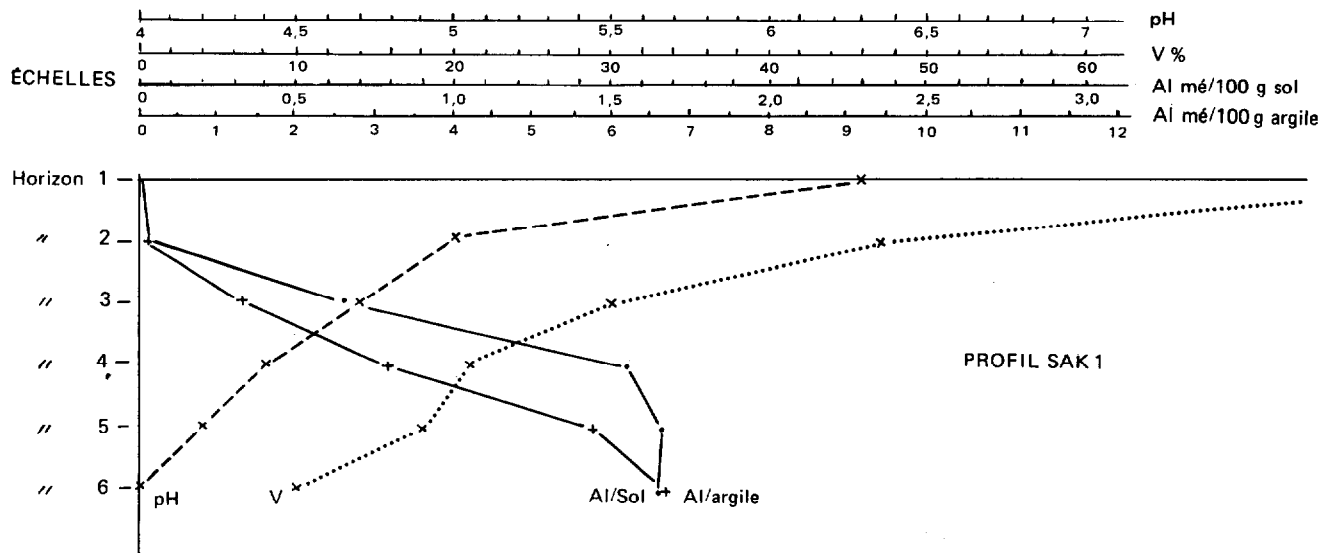


FIG. 5. — Evolution de pH, de pourcentage de saturation (V), d'aluminium échangeable pour 100 g de sol et d'aluminium échangeable pour 100 g d'argile à travers le profil SAK<sub>1</sub>.

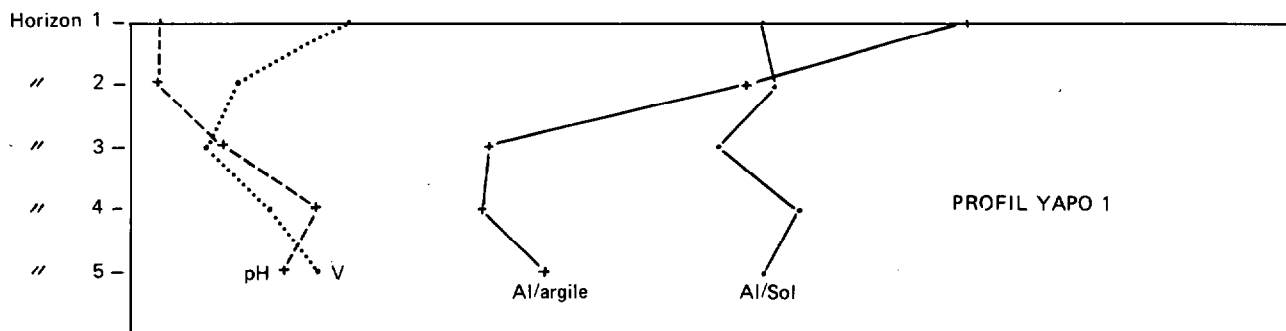


FIG. 6. — Evolution de pH, de pourcentage de saturation (V), d'aluminium échangeable pour 100 g de sol et d'aluminium échangeable pour 100 g d'argile à travers le profil YAPO<sub>1</sub>.

## 5. CONCLUSION

Les résultats obtenus permettent de conclure que :

Parmi les procédés d'extraction de l'aluminium échangeable par une solution saline, la méthode par percolation sur colonne est à déconseiller. Les deux autres techniques, par centrifugation et par lessivage à volume constant, sont aussi précises l'une que l'autre. Dans notre étude, on a opté pour le lessivage à volume constant du fait de sa maniabilité dans des mesures en grande série.

En ce qui concerne le dosage, on a opté pour la méthode colorimétrique en raison de sa maniabilité, d'autant plus que le dosage peut être effectué avec l'auto-analyseur. Au point de vue précision, elle est aussi bonne que la méthode par titrimétrie.

Pour que le pH de la solution d'extraction, on a vu que la différence de l'aluminium extrait entre une solution à pH 4,5 et une solution à pH non ajusté est peu importante. On a décidé dans cette étude d'utiliser la solution normale de chlorure de potassium sans aucun ajustement de pH.

Les résultats de teneur en aluminium échangeable extrait par une solution de chlorure de potassium normale, montrent que :

— Dans les sols peu acides, contenant, en plus de la kaolinite, de la métahalloysite, l'aluminium échangeable ne se manifeste pas. Par contre, dans les sols acides et désaturés où la fraction argileuse est composée presque exclusivement de kaolinite et quelquefois d'un peu de gibbsite, l'aluminium échangeable est présent dans les différents horizons.

— On peut diagnostiquer la présence d'aluminium échangeable jusqu'à des pH de 5,1 environ. En ce qui concerne le degré de saturation, la valeur maximale de ce dernier à laquelle on peut encore extraire de l'aluminium échangeable est de 30 % environ.

— La teneur en aluminium échangeable présente une corrélation négative et très significative avec

le pH du sol (pour des échantillons à  $\text{pH} \leq 5,1$ ). Par contre, avec le degré de saturation, la corrélation est toujours négative, mais peu significative.

Le pH et le degré de saturation n'ont pas une corrélation significative. Ils peuvent donc jouer un rôle antagoniste l'un vis-à-vis de l'autre pour ce qui concerne la teneur en aluminium échangeable. L'action du pH est nettement prédominante sur celle du degré de saturation.

En suivant l'évolution de l'aluminium échangeable à travers le profil, on constate que le pH reflète plus la richesse en aluminium échangeable des argiles que celle de l'échantillon lui-même.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'ORSTOM le 13 octobre 1976.

#### BIBLIOGRAPHIE

- BLANCHET (R.), 1960. — Apparition d'aluminium échangeable au cours de l'acidification d'un sol. *C.R. Acad. Sci.*, 251 : 1415-1417.
- BLANCHET (R.), PERIGAUD (S.), CHAUMONT (C.), 1960. — Acidité d'échange et aluminium libre ou échangeable. *Ann. Agro.*, n° 6, Série A : 621-649.
- CHARLOT (T.C.), 1961. — Dosage colorimétrique des éléments minéraux. Principes et méthodes. Masson et Cie, Paris, 380 p.
- DABIN (B.), 1966. — Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. VII, n° 3 : 77-103.
- DECKERS (J.), VAN STALLEN (R.), 1955. — Contribution à l'étude de la saturation en bases des sols bruns de l'Ardenne et la Famene. *Agriculture*, 3 : 311-340.
- FRIED (M.), SHAPIRO (R.E.), 1956. — Phosphate supply pattern of various soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 4 : 471-475.
- HUSSEIN (M.J.), 1970. — Extractable aluminium content in some Hawaiian in soils. *Pak. J. Sci. Ind. Res.*, 12, 3 : 217-221.
- JACKSON (M.L.), 1963. — Aluminium bonding in soils: a unifying principle in soil Science. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 27 : 1-10.
- LITTLE (I.), 1964. — The determination of exchangeable aluminium in soils. *Austr. J. Soil Res.*, 2, 1 : 76-82.
- LOW (Ph.), 1955. — The role of aluminium in the titration of bentonite, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 19 : 135-139.
- MCLEAN (E.O.) *et al.*, 1958. — Aluminium in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 22 : 382-387.
- MCLEAN (E.O.), OWEN (E.J.), 1969. — Effects of pH on the contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacities. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 6 : 855-858.
- PELLOUX (P.), 1963. — Méthodes de détermination des cations échangeables, de la capacité d'échange, dans les sols courants calcaires ou non. *ORSTOM*, 54 p.
- PRATT (P.F.), BAIR (F.L.), 1961. — A comparison of three reagents for the extraction of aluminium from soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 91, 6 : 357-359.
- SEGALEN (P.), LEAL SILVA (J.N.), 1969. — Le fer, le manganèse, l'aluminium et la silice facilement extractibles dans les sols tropicaux à sesquioxydes. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, vol. VII, n° 3 : 287-310.
- SEGALEN (P.), 1973. — L'aluminium dans les sols. *ORSTOM*, Paris, 281 p.
- SKEEN (J.B.), SUMNER (M.E.), 1965. — Measurement of exchangeable aluminium in acidic soils. *Nature*, London, 208, 712 p.
- VOLOBUYEV (V.R.), 1962. — Change in the content of silica, alumina and iron in soils, in relation of hydrothermal conditions. *Sov. Soil Sci.*, 5 : 509-515.