

Essais d'élimination de l'aluminium échangeable par application d'engrais ($\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$, KNO_3 , CaO)⁽¹⁾

Sambath TRINH

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

RÉSUMÉ

Parmi les engrais qui ont été utilisés en vue d'éliminer l'aluminium échangeable, seule la chaux donne des résultats satisfaisants, aussi bien dans la neutralisation de l'aluminium échangeable, qu'en ce qui concerne le coût de l'opération. En effet, elle agit en même temps sur le pH et sur l'aluminium échangeable, alors que le phosphate n'agit que sur l'aluminium avec une efficacité moins grande, et que le nitrate de potassium est sans action.

L'apport de phosphate monopotassique sur des échantillons préalablement traités à la chaux évite la fixation du premier par l'aluminium échangeable. Mais il est probable que la transposition de l'expérience sur le terrain s'avérerait trop onéreuse.

On peut estimer la dose de chaux à apporter aux sols pour neutraliser l'aluminium échangeable. On estime, à partir de la valeur de l'aluminium échangeable, que deux tonnes de chaux environ par hectare sont nécessaires pour neutraliser un milliéquivalent d'aluminium.

Le comportement de l'aluminium échangeable en fonction de l'augmentation de la dose de phosphate et de chaux, semble indiquer que l'aluminium extrait par la solution de chlorure de potassium normal non tamponnée n'est pas fixé avec la même intensité sur le complexe adsorbant.

ABSTRACT

Among the fertilizers tried to eliminate exchangeable aluminium, only lime gives satisfactory results on the neutralization of exchangeable aluminium as well as on the cost of the operation. Indeed, lime affects at the same time pH and exchangeable aluminium, when phosphates acts only on aluminium with less efficiency and potassium nitrate is effectless.

When monopotassic phosphate is added previously to lime treated samples, phosphate is not fixed by aluminium. But it is likely that the transposition of the experiment in the field would cost too much money.

One can estimate the amount of lime necessary to neutralize exchangeable aluminium. It is calculated, after the value of exchangeable aluminium, that about two tons of lime per hectare, are necessary to neutralize one milliéquivalent of aluminium.

The behaviour of the exchangeable aluminium against the increase of the amount of phosphate and lime, seems to indicate that all the aluminium extracted by the normal inbuffered potassium chloride solution is not fixed on the absorption complex with the same strength.

(1) Extrait d'un mémoire présenté en vue de l'obtention du Doctorat de 3^e cycle à l'Université de Paris VI en 1976.

PLAN

1. INTRODUCTION
2. MATÉRIEL ÉTUDIÉ
3. APPLICATION DE PHOSPHATE MONOPOTASSIQUE
4. APPLICATION DE NITRATE DE POTASSIUM
5. APPLICATION DE CHAUX
6. APPLICATION COMBINÉE DE CHAUX ET DE PHOSPHATE MONOPOTASSIQUE
7. RÉFÉRENCES

1. INTRODUCTION

Parmi les trois formes de constituants alumineux du sol étudiés dans les deux articles précédents (Trinh, 1976), seul l'aluminium échangeable a une action néfaste sur les plantes. Les constituants alumineux amorphes sont plutôt bénéfiques, du fait que leur présence empêche le pH de descendre trop rapidement lors de l'attaque du sol par des substances organiques ou minérales acides produites au cours de la pédogenèse. Ainsi, lorsqu'on veut résoudre le problème de la toxicité pour les plantes de l'aluminium des sols acides, on cherche à agir sur la forme échangeable, en essayant de l'immobiliser définitivement en la transformant en une autre forme.

L'aluminium échangeable peut être éliminé des sites d'échange et de la solution du milieu, en le transformant en phosphates ou en hydroxydes d'aluminium qui sont très peu solubles.

Les produits utilisés pour ces essais sont : le phosphate monopotassique, la chaux vive, et le nitrate de potassium, d'abord utilisés séparément, puis sous forme combinée entre le phosphate monopotassique et la chaux.

Ces essais ont pour but principal de voir l'action des engrais sur l'aluminium échangeable. Les résultats obtenus permettent aussi de donner un aperçu des différentes formes de liaison de l'aluminium extrait par la solution de chlorure de potassium normal.

2. MATÉRIEL ÉTUDIÉ

Les échantillons utilisés sont au nombre de six, correspondant à des horizons de surface et de moyenne profondeur : RM 2-3, OY 16-2, OY 16-3, SAK 1-3,

YAPO 1-1 et YAPO 1-2. Tous ces échantillons sont relativement acides et désaturés. Ils présentent tous de l'aluminium échangeable. La description et les caractéristiques de ces sols sont donnés en détail dans l'article sur l'aluminium échangeable des sols acides de quelques pays d'Afrique Occidentale et de Madagascar (*Cahiers ORSTOM, Pédol.*, vol. XIV, n° 3, pp. 207-218).

3. APPLICATION DE PHOSPHATE MONOPOTASSIQUE

3.1. Modalité des essais

Le phosphate monopotassique utilisé a une pureté de 95 %.

Les doses apportées sont de : 0 ; 0,5 ; 0,8 ; 1,0 et 1,5 tonne à l'hectare, et elles sont calculées sur une épaisseur de sol de 30 cm. Ce qui fait pour 5 g d'échantillon un apport de :

0 ml	de solution de phosphate (à 1 g/l)	pour le témoin		
2,1 ml	—	—	—	pour la dose 0,5 t/ha
3,4 ml	—	—	—	0,8 t/ha
4,2 ml	—	—	—	1,0 t/ha
6,3 ml	—	—	—	1,5 t/ha

Une fois l'engrais ajouté, les échantillons sont humectés à la capacité de rétention. On les laisse sécher à l'air ambiant. On répète plusieurs fois l'opération d'humectation et de séchage, pendant trois semaines. Après quoi, les échantillons séchés sont prêts à subir les opérations d'extraction d'aluminium échangeable avec la solution de chlorure de potassium normal, non tamponnée.

On mesure, sur les extraits, le pH et la teneur en aluminium.

3.2. Résultats

Les valeurs trouvées (tabl. I) pour les différents traitements montrent que le phosphate monopotassique a une action positive dans l'élimination de l'aluminium échangeable. L'extraction de ce dernier par la solution saline diminue progressivement quand on augmente la dose d'engrais de 0,5 à 1,5 t/ha, soit de 0,308 à 0,930 mé d'ions PO_4H_2 pour 100 g d'échantillon.

TABLEAU I

Résultats du traitement au phosphate sur l'aluminium échangeable

Echantillons	Valeurs mesurées	Doses de phosphate (PO ₄ H ₂ K)				
		Témoin	0,5 t/ha	0,8 t/ha	1,0 t/ha	1,5 t/ha
RM 2-3	Al. échan. (mé) pour 100 g	1,38 (3,63)	1,12	1,08	0,97	0,63
	Al. éch. fixé (*)	—	28,3	23,6	22,2	23,5
	pH du filtrat	4,38	4,48	4,46	4,48	4,44
OY 16-2	Al. éch. en mé pour 100 g	0,70 (1,79)	0,48	0,34	0,36	0,30
	Al. éch. fixé (*)	—	23,9	28,3	18,4	14,4
	pH du filtrat	4,36	4,33	4,39	4,33	4,39
OY 16-3	Al. éch. en mé pour 100 g	1,02 (1,96)	0,99	0,82	0,76	0,67
	Al. éch. fixé (*)	—	3,3	15,7	14,1	12,6
	pH du filtrat	4,34	4,31	4,42	4,30	4,30
SAK 1-3	Al. éch. en mé pour 100 g	0,55 (1,17)	0,52	0,54	0,48	0,42
	Al. éch. fixé (*)	—	3,3	0,8	3,8	4,7
	pH du filtrat	4,14	4,08	4,08	4,14	4,14
YAPO 1-1	Al. éch. en mé pour 100 g	2,24 (11,76)	1,80	1,72	1,62	1,42
	Al. éch. fixé (*)	—	47,8	40,9	33,5	29,6
	pH du filtrat	3,82	3,82	3,78	3,72	3,72
YAPO 1-2	Al. éch. en mé pour 100 g	2,19 (8,42)	1,89	1,81	1,74	1,56
	Al. éch. fixé (*)	—	32,6	29,9	24,3	22,7
	pH du filtrat	4,07	4,01	4,01	3,98	3,96

(*) = Aluminium échangeable fixé par le phosphate en pourcent de PO₄H₂K apporté.

(*) Aluminium échangeable exprimé en mé pour 100 g d'argile.

Ce résultat rejoint la constatation faite par Haseman *et al.* en 1950 et par Randall *et al.* en 1963; ces auteurs ont observé, que l'enlèvement d'aluminium échangeable diminue la fixation du phosphore dans le sol.

La réaction entre le phosphate et l'aluminium échangeable semble donc possible. Mais on peut se demander sous quelle forme le phosphate monopotassique agit avec l'aluminium. Sur ce point, il existe une littérature abondante, notamment de

Swenson *et al.* en 1949 et de Gastuche *et al.* en 1963 ; Swenson a constaté que dans la zone comprise entre pH 4 et 3,5, le phosphate se trouve surtout sous forme PO_4H_2^- , ce qui correspond à peu près au cas présent, puisque le pH mesuré dans les extraits est voisin de 4. Par ailleurs, Gastuche *et al.* ont observé que les ions PO_4H_2^- se forment plus facilement dans une solution à faible concentration de phosphate.

Les ions PO_4H_2^- en réagissant avec l'aluminium peuvent donner à long terme, selon Taylor et Gurney (1964) un produit ressemblant plus aux taranakites $(\text{KAl}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2(\text{OH})2\text{H}_2\text{O})$ qu'aux variscites $(\text{PO}_4\text{Al}, 2\text{H}_2\text{O})$.

Mais tout ce qu'on peut dire ici après trois semaines d'apport de phosphate monopotassique, c'est qu'on obtient un produit peu soluble dans la solution de chlorure de potassium normal, mais qui est extractible par l'acide chlorhydrique à 1 %.

L'aluminium échangeable supposé fixé par le phosphate, et exprimé en pour cent de la dose de ce dernier, est variable selon les échantillons et diminue progressivement quand on augmente la dose de phosphate.

L'efficacité du phosphate sur l'aluminium échangeable est donc variable suivant les échantillons. La part de phosphate qui est supposée réagir avec l'aluminium échangeable, passe de moins de 1 % pour SAK 1-3 à plus de 40 % pour YAPO 1-1. Cette variation semble liée aux valeurs de l'aluminium échangeable exprimées en milliéquivalents pour 100 g d'argile, donc à la richesse de l'argile en aluminium échangeable. En effet, le pourcentage de phosphate qui participe à l'immobilisation de l'aluminium échangeable est plus ou moins élevé suivant que les échantillons présentent des argiles plus ou moins riches en aluminium échangeable. Tout se passe comme s'il existait deux ensembles de forces de liaison d'intensité différente de l'aluminium échangeable sur les complexes adsorbants. Et plus l'argile est riche en aluminium extractible par la solution saline, plus l'ensemble de l'aluminium à force de liaison de faible intensité est grande. Cette constatation semble être appuyée par le fait que le pourcentage de phosphate qui contribue à la fixation de l'aluminium échangeable, diminue progressivement quand on augmente la dose d'engrais comme si la fraction de l'aluminium échangeable la plus « labile » était rapidement captée par les ions phosphate, d'où une diminution d'efficacité de ce dernier.

On peut s'interroger ensuite sur la destination de la fraction du phosphate qui ne réagit pas avec l'aluminium échangeable. D'après Fried *et al.* (1955) et Hemwall (1957), la réaction du phosphate sur les hydroxydes d'aluminium amorphes est possible et elle est même très rapide (30 minutes).

On peut donc conclure que l'aluminium échangeable peut réagir avec le phosphate monopotassique pour donner des produits peu solubles. Le phosphate ne réagit pas en priorité avec l'aluminium échangeable, puisqu'une plus grande partie va s'attaquer à d'autres produits (minéraux argileux, hydroxydes cristallisés et amorphes).

L'apport de phosphate monopotassique seul peut donc diminuer la teneur en aluminium échangeable d'un sol. Mais il ne semble pas avoir une action sur le pH, puisque les solutions extraites des échantillons traités ont pratiquement la même acidité que l'extrait témoin.

Autrement dit, le phosphate monopotassique agit sur l'acidité potentielle du sol et peut ne pas avoir d'influence sur l'acidité du sol due à des ions hydrogène.

Ces résultats peuvent être intéressants au point de vue théorique, mais dans la pratique, la correction des sols acides et désaturés par apport de phosphate seul est peu efficace et coûte excessivement cher.

4. APPLICATION DE NITRATE DE POTASSIUM

4.1. Modalité des essais

La procédure est analogue à celle des essais précédents. La dose est du même ordre, c'est-à-dire 0 ; 0,5 ; 0,8 ; 1,0 et 1,5 tonne à l'hectare.

4.2. Résultats (tabl. II)

Dans l'ensemble, l'apport de nitrate de potassium ne semble pas agir sur l'aluminium échangeable, ni sur le pH des solutions filtrées. On observe quand même une légère diminution de l'aluminium extrait lorsqu'on augmente la dose de nitrate de potassium, mais la différence avec le témoin est trop faible pour qu'on puisse en tenir compte.

Cela confirme donc que le potassium est sans effet et que dans les essais précédents, c'est bien l'ion PO_4H_2^- qui intervient.

TABLEAU II

Résultats du traitement au nitrate de potassium sur l'aluminium échangeable

Echantillons	Valeurs mesurées	Doses de nitrate de potassium (KNO ₃)				
		Témoin	0,5 t/ha	0,8 t/ha	1,0 t/ha	1,5 t/ha
RM 2-3	Al. éch. en mé pour 100 g ..	1,38	1,59	1,35	1,44	1,38
	pH du filtrat	4,38	4,39	4,39	4,38	4,39
OY 16-2	Al. éch. en mé pour 100 g ..	0,70	0,72	0,72	0,66	0,66
	pH du filtrat	4,36	4,32	4,32	4,31	4,42
OY 16-3	Al. éch. en mé pour 100 g ..	1,02	0,97	0,96	0,84	0,84
	pH du filtrat	4,34	4,33	4,34	4,32	4,36
SAK 1-3	Al. éch. en mé pour 100 g ..	0,55	0,54	0,52	0,48	0,46
	pH du filtrat	4,14	4,10	4,08	4,09	4,10
YAPO 1-1	Al. éch. en mé pour 100 g ..	2,24	2,05	2,04	2,05	2,10
	pH du filtrat	3,82	3,88	3,84	3,82	3,80
YAPO 1-2	Al. éch. en mé pour 100 g ..	2,19	2,13	1,98	2,07	2,02
	pH du filtrat	4,07	4,06	4,11	4,06	4,10

5. APPLICATION DE CHAUX

5.1. Modalité des essais

Les grandes lignes du mode opératoire sont les mêmes que précédemment, mais avec des doses différentes appliquées sur 20 g de sol. On a retenu quatre doses, en plus du témoin :

- 2 t/ha, soit 0,011 g de CaO pour 20 g de terre
- 4 t/ha, soit 0,022 g — — —
- 6 t/ha, soit 0,034 g — — —
- 8 t/ha, soit 0,044 g — — —

Après l'opération d'humectation et de séchage successifs pendant trois semaines, on prélève dans chaque traitement 5 g d'échantillon pour extraire l'aluminium échangeable.

5.2. Résultats (tabl. III)

L'action de la chaux sur l'aluminium échangeable est différente de celle du phosphate. En effet, la chaux vive au contact de l'eau, s'hydrate en Ca(OH)₂. Ensuite ce sont les ions OH⁻ qui réagissent avec les cations alumineux (Al⁺⁺⁺, AlOH⁺⁺, Al(OH)₂⁺) pour donner l'hydroxyde d'aluminium qui est insoluble. L'hydroxyde d'aluminium peut se former théoriquement dans un milieu à pH compris entre 4,5 et 8.

Lorsqu'on ajoute de la chaux dans le sol, il peut se passer les faits suivants :

- dissociation de la chaux en Ca⁺⁺ et OH⁻ ;
- les ions Ca⁺⁺ peuvent prendre la place de l'aluminium des sites d'échange ;
- l'aluminium libéré par le calcium précipite sous forme d'hydroxyde quand la concentration en ions hydroxydes dans le milieu est suffisante pour atteindre la zone de pH comprise entre 4,5 et 8.

TABLEAU III

Résultats du traitement à la chaux (CaO) sur l'aluminium échangeable

Echantillons	Valeurs mesurées	Doses de chaux (CaO)				
		Témoin	2 t/ha	4 t/ha	6 t/ha	8 t/ha
RM 2-3	Al. éch. en mé pour 100 g ..	1,38 (3,63)	0,45	0,03	0,00	0,00
	Al. éch. fixé (1)	—	47,5	31,4	—	—
	pH du filtrat	4,38	4,60	4,88	5,15	5,68
OY 16-2	Al. éch. en mé pour 100 g ..	0,70 (1,79)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Al. éch. fixé (1)	—	—	—	—	—
	pH du filtrat	4,36	4,80	5,28	5,83	6,28
OY 16-3	Al. éch. en mé pour 100 g ..	1,02 (1,96)	0,16	0,00	0,00	0,00
	Al. éch. fixé (1)	—	43,9	—	—	—
	pH du filtrat	4,34	4,67	5,20	5,90	6,20
SAK 1-3	Al. éch. en mé pour 100 g ..	0,55 (1,17)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Al. éch. fixé (1)	—	—	—	—	—
	pH du filtrat	4,14	4,81	5,68	6,42	6,76
YAPO 1-1	Al. éch. en mé pour 100 g ..	2,24 (11,76)	0,81	0,15	0,07	0,03
	Al. éch. fixé (1)	—	72,9	53,3	36,9	—
	pH du filtrat	3,82	4,20	4,69	5,10	5,34
YAPO 1-2	Al. éch. en mé pour 100 g ..	2,19 (8,42)	0,70	0,07	0,00	0,00
	Al. éch. fixé (1)	—	76,0	54,1	—	—
	pH du filtrat	4,07	4,40	4,82	5,50	6,01

(1) Aluminium échangeable insolubilisé par le chaulage exprimé en % de chaux apportée dans le sol.

(*) = Aluminium échangeable exprimé en mé pour 100 g d'argile.

Les valeurs trouvées montrent que l'action de la chaux est positive pour neutraliser l'aluminium échangeable.

Les doses de chaux exprimées en milliéquivalents pour 100 g d'échantillon sont respectivement de 1,96 ; 3,92 ; 5,88 et 7,84 mé de Ca⁺⁺.

La quantité d'aluminium échangeable neutralisée par l'apport de chaux de 2 tonnes à l'hectare (soit 1,96 mé pour 100 g de sol), varie entre 0,86 mé pour OY 16-3 et 1,49 mé pour YAPO 1-2. Ce qui donne une efficacité de la chaux de 44 à 76 %. On peut remarquer que ces valeurs en pourcentage sont

les plus élevées pour YAPO 1-1 et YAPO 1-2 comme dans les essais d'engrais phosphaté. De même, elles diminuent progressivement quand on augmente la dose de chaux. Ceci nous amène à la même conclusion que dans les essais de phosphate, c'est-à-dire que tout l'aluminium échangeable extrait par la solution saline n'est pas fixé avec la même intensité sur le complexe et que l'ensemble de l'aluminium le plus « labile » est important dans les échantillons présentant des argiles riches en aluminium échangeable.

Quant à l'action de la chaux sur l'acidité de la solution filtrée, on peut observer que tant qu'il reste encore de l'aluminium échangeable, le pH ne s'écarte pas beaucoup de 4,5. Une fois que tout l'aluminium est neutralisé, le pH augmente rapidement lors de l'apport de la chaux.

La chaux a donc une double action sur les sols acides et désaturés. Elle neutralise d'abord l'aluminium échangeable, puis elle augmente le pH du milieu.

D'après les résultats des six échantillons étudiés, on peut estimer à peu près la dose de la chaux à apporter aux sols riches en aluminium échangeable, pour neutraliser ce dernier. On a vu que l'efficacité de la chaux apportée pour neutraliser l'aluminium, varie de 44 à 76 %. Donc, en prenant comme base de calcul une efficacité moyenne de 50 %, on peut résoudre la plupart des problèmes d'estimation de la dose de chaux nécessaire pour neutraliser l'aluminium échangeable. Cela signifie qu'il faut deux fois plus de chaux (en milliéquivalents) que la quantité d'aluminium échangeable présente dans le sol. Par exemple, pour l'échantillon OY 16-3, la teneur en aluminium échangeable est de 1,02 mé/100 g de sol ; il faut donc apporter 2,04 mé de chaux pour le neutraliser. La formule de conversion en apport par hectare est :

$$X = \frac{PM \times a \times (S \times h \times d)}{Me \times 100} = \text{tonnes à l'hectare}$$

PM : poids moléculaire de CaO ; a : valeur de la chaux à apporter pour 100 g de terre (2,04 mé pour OY 16-3) ; S : 10 000 m² ; h : 0,30 m ; d : 1,2 (densité apparente de la terre) ; Me : 2 000 mé de Ca⁺⁺ par molécule gramme.

On a donc trouvé :

pour OY 16-3 : X = 2,064 t/ha

pour YAPO 1-1 : X = 4,524 t/ha

pour RM 2-3 : X = 2,787 t/ha

pour SAK 1-3 = 1,111 t/ha, etc.

Ce ne sont là que des valeurs approximatives. Il faut majorer la dose pour les très fortes teneurs en aluminium échangeable, étant donné que la proportion entre l'aluminium faiblement et fortement fixé est différente.

Cette estimation semble rejoindre les expériences effectuées sur le terrain par Spain (1971) en Colombie, où une dose de deux tonnes de chaux à l'hectare était nécessaire pour neutraliser un milliéquivalent d'aluminium échangeable. Kamprath (1967) a estimé que la neutralisation seule de l'aluminium échangeable est suffisante pour avoir des améliorations appréciables de rendement. Mais Spain remarque que le chaulage peut coûter très cher pour certains pays, et il suggère d'orienter la recherche vers la sélection des plantes résistantes.

6. APPLICATION COMBINÉE DE CHAUX ET DE PHOSPHATE MONOPOTASSIQUE

6.1. Modalité des essais

On prélève 5 g des échantillons traités à la chaux de l'expérience précédente. On ajoute dans chaque traitement à la chaux l'équivalent de 0,5 t/ha de phosphatasse, soit 0,96 mé de PO₄H₂ pour 100 g d'échantillon.

On leur fait subir ensuite l'opération d'humectation et de séchage pendant deux semaines, avant de procéder à l'extraction à la solution saline.

Ces essais n'ont été portés que sur les échantillons les plus intéressants YAPO 1-1, YAPO 1-2 et RM 2-3.

6.2. Résultats (tableau IV)

L'addition de phosphate monopotassique sur un échantillon déjà traité par la chaux, contribue à renforcer l'action de cette dernière pour neutraliser l'aluminium échangeable.

Mais, dans l'ensemble, l'action du phosphate sur l'aluminium échangeable non neutralisé par le traitement à la chaux est faible, et elle est plus faible encore quand l'aluminium restant après le traitement à la chaux est plus important.

TABLEAU IV

Résultat du traitement combiné de CaO avec PO_4H_2K sur l'aluminium échangeable

Echantillons	Valeurs mesurées	Traitement combiné de CaO avec PO_4H_2K				
		Témoin	2t CaO+0,5t PO_4H_2	4 t CaO+0,5 t P	6 t CaO+0,5 t P	8 t CaO+0,5 t P
RM 2-3	Al. éch. en mé pour 100 g	1,38	0,34	0,06	0	0
	pH du Filtrat	4,38	4,65	5,02	4,92	5,27
YAPO 1-1	Al. éch. en mé pour 100 g	2,24	0,55	0,12	0	0
	pH du filtrat	3,82	4,25	4,63	4,82	5,40
YAPO 1-2	Al. éch. en mé pour 100 g	2,19	0,63	0	0	0
	pH du filtrat	4,07	4,36	4,80	5,50	5,99

Quant à son action sur le pH elle est sans effet. Les pH mesurés dans les liquides filtrés sont pratiquement les mêmes que ceux du traitement à la chaux correspondant.

Le traitement préalable de l'échantillon à la chaux

évite donc la fixation des phosphates par l'aluminium échangeable. Mais le risque de fixation sur les autres produits existe toujours.

Manuscrit reçu au Service des Publications le 6 juin 1977.

BIBLIOGRAPHIE

- FRIED (M.), DEAN (L.A.), 1955. — Phosphate retention by iron and aluminium in cation exchange systems. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 19 : 143-147.
- GASTUCHE (M.C.), FRIPIAT (J.J.), SOKOLSKI (S.), 1963. — Fixation du phosphore par les hydroxydes de fer et d'aluminium amorphes et cristallisés. *Pédologie*, XIII : 150-180.
- HASEMAN (J.F.), BROWN (E.H.), WHITT (C.D.), 1950. — Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminium. *Soil Sci.*, 70, 4 : 257-272.
- HEMWALL (J.B.), 1957. — The role of soil clay minerals in phosphorus fixations. *Soil Sci.*, 83 : 101-108.
- KAMPRATH (E.J.), 1967. — Soil acidity and response to liming. *Tech. Bull.*, n° 4, International Soil Testing Series-North Caroline State University with A.I.D. Department of State, Washington D.C.
- RANDALL (P.J.), VOSE (P.B.), 1963. — Effect of aluminium on uptake and translocation of phosphorus 32 by perennial rye-grass. *Plant. Physiol.*, 32 : 403-409.
- SPAIN (J.M.), 1971. — El problems de la acidez en suelos de los llanos orientales : posibles soluciones. Conf. latino americana des sols Maracay Venezuela.
- SWENSON (R.M.), COLE (C.V.), SIELING (D.H.) 1949. — Fixation and phosphate by iron and aluminium and replacement by organic and inorganic ions. *Soil Sci.*, 67 : 3-22.
- TAYLOR (A.W.), GURNEY (E.L.), 1964. — Solubility of variscite. *Soil Sci.*, 98, I : 9-13.
- TAYLOR (A.W.), GURNEY (E.L.), 1964. — The dissolution of basic potassium and ammonium phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28 : 289-290.
- TRINH (S.), 1976. — L'aluminium échangeable dans les sols acides de quelques pays d'Afrique Occidentale et de Madagascar. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XIV, n° 3 : 207-218.
- TRINH (S.), 197. — Rôle tampon des constituants alumineux dans les sols acides.