

Carence et fixation du phosphore dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie

Phosphorus deficiency and fixation in Geric Ferralsols of New Caledonia

L'HUILLIER Laurent (1), DUPONT Sylvie (1), DUBUS Igor (1), BECQUER Thierry (1,2), BOURDON Emmanuel (1,3), LAUBREAUX Patrick (4), BONZON Bernard (1).

(1) ORSTOM, Centre de Nouméa, BP A5, 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

(2) ORSTOM, c/o CNRS, Centre de Pédologie Biologique, BP 5, 54501 Vandoeuvre-les-Nancy, France

(3) ORSTOM, L.C.S.C., BP 5045, Montpellier cedex, France

(4) CREA, BP 37, 98870 Bourail, Nouvelle-Calédonie

Développés à partir de péridotites, les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie se distinguent par des teneurs élevées en oxydes de fer, générant une très forte capacité de fixation du phosphore (P), qui est une des principales raisons de l'infertilité naturelle de ces sols. Leurs surfaces relativement importantes et le développement de l'agriculture dans cette région très arrosée font de ces sols un modèle particulièrement intéressant pour étudier la fixation de P et la carence en cet élément sur les cultures.

Une expérimentation au champ sur ce type de sol a été installée en 1994 avec pour objectif d'étudier les effets et les arrières-effets d'amendements phosphatés initiaux sur le développement du maïs. Le premier cycle cultural n'a révélé pratiquement que des tendances sur le rendement, les différences entre les traitements (4, 6, 8, 10 et 12 t ha⁻¹ de P₂O₅) n'étant pas significatives. Par contre, le second cycle a montré une influence significative de ces traitements initiaux : les rendements en grains variaient de 5 à 9,5 t ha⁻¹ pour les doses de 4 à 12 t ha⁻¹ de P₂O₅. Lors du troisième cycle, tous les rendements ont chuté et variaient de 0,1 à 2,2 t ha⁻¹ pour les mêmes apports initiaux de P.

A la fin du second cycle de culture, des échantillons de sol ont été prélevés sur le champ pour réaliser une expérimentation en serre visant à étudier l'effet d'apports complémentaires d'amendement phosphaté. Les sols qui avaient déjà reçu auparavant 4, 8 et 12 t ha⁻¹ de P₂O₅ ont reçu des apports complémentaires de 0, 2, 4 et 6 t ha⁻¹ de P₂O₅. Ces apports complémentaires se sont révélés d'autant plus nécessaires, pour lever la carence en P sur maïs, que les apports initiaux appliqués en plein champ étaient faibles.

Une fixation progressive - et néanmoins rapide - mais très puissante du phosphate sur les oxydes de fer et d'aluminium du sol est la raison de cette baisse annuelle du rendement. La capacité considérable qu'ont ces sols à fixer très énergiquement P et les possibilités d'y remédier sont discutées.

Mots clés : phosphore, carence, fixation, sols ferrallitiques ferritiques, roches ultrabasiques, Nouvelle-Calédonie.

Keywords : phosphorus, deficiency, sorption, Oxisols, Geric Ferralsols, ultramafic rocks, New Caledonia.

No. d'enregistrement scientifique : 1022
Symposium no. : 13B
Présentation : poster

Carence et fixation du phosphore dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie Phosphorus deficiency and fixation in Geric Ferralsols of New Caledonia

**L'HUILLIER Laurent (1), DUPONT Sylvie (1), DUBUS Igor (1), BECQUER
Thierry (1,2), BOURDON Emmanuel (1,3), LAUBREAUX Patrick (4), BONZON
Bernard (1).**

- (1) ORSTOM, Centre de Nouméa, BP A5, 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie
(2) ORSTOM, c/o CNRS, Centre de Pédologie Biologique, BP 5, 54501 Vandoeuvre-
les-Nancy, France
(3) ORSTOM, L.C.S.C., BP 5045, Montpellier cedex, France
(4) CREA, BP 37, 98870 Bourail, Nouvelle-Calédonie

Introduction

La carence en P est un des problèmes agronomiques les plus souvent rencontrés dans les sols riches en oxydes de fer et d'aluminium, qui occupent des surfaces très importantes dans la zone intertropicale (Uehara and Gillman, 1981). Les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium sont en effet les constituants qui ont le plus d'influence sur la fixation des ions phosphates dans les sols (McLaughlin *et al.*, 1981 ; Borggaard, 1983).

En Nouvelle-Calédonie, les sols dérivés des roches ultrabasiques recouvrent près du tiers du territoire (environ 500 000 ha). L'altération intense de ces roches, sous climat tropical humide, a conduit à la formation de sols très riches en oxy-hydroxydes de fer, dont les sols ferrallitiques ferritiques qui sont les plus évolués (Latham *et al.*, 1978).

Les premiers essais en serre sur ces sols ont montré qu'il était nécessaire d'apporter des quantités très importantes de P pour lever sa carence : une dose optimale de 7 t ha⁻¹ de P₂O₅ a été mise en évidence pour le maïs, la laitue et le haricot (Gourdon *et al.*, 1992 ; Capart et Bonzon, 1993).

A l'issue de ces expérimentations, il s'est avéré indispensable de vérifier en plein champ les résultats obtenus en serre. La question de l'évolution de la fixation du phosphore à long terme sur ces sols était également importante, puisqu'il est généralement admis qu'il existe, après une première réaction très rapide de fixation de P sur le sol, une seconde phase beaucoup plus lente de diminution de la concentration en P dans la solution du sol (Mumms and Fox, 1976).

Les objectifs de cette étude sont ainsi de : (1) déterminer la dose optimale de P à apporter pour une culture de maïs en plein champ sur un sol ferrallitique ferritique, (2)

suivre les arrières-effets sur plusieurs cycles de culture des apports initiaux de P sur ce sol.

Matériel et méthodes

Les sols étudiés sont classés dans les sols ferrallitiques ferritiques selon la classification française et dans les Geric Ferralsols selon la classification FAO. Ce sont des sols oxydiques très évolués provenant de l'altération de péridotites – principales roches mères de la région – et caractérisés en particulier par de très fortes teneurs en oxydes de fer. Les études ont été menées à Ouénarou, au sud de la Nouvelle-Calédonie (166°43'30"E – 22°8'15"S). Les caractéristiques moyennes du sol du site sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques du sol ferrallitique ferritique de l'étude, avant mise en culture (valeurs moyennes issues des 25 parcelles de l'essai au champ).

| Horizon (cm) | pH ^a | | C (%) ^b | N (%) ^c | Bases échangeables (cmol kg ⁻¹) ^d | | | | CEC | Fe ₂ O ₃ (%) ^e | Al ₂ O ₃ (%) ^e | Phosphore (mg kg ⁻¹) ^f | |
|-----------------|------------------|-----|-----------------------|-----------------------|---|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--------|
| | H ₂ O | KCl | | | Ca | Mg | K | Na | | | | Total | Assim. |
| | 0-20 | 5,2 | 5,7 | 2,0 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 4,5 | 60,7 | 7,2 | 91,0 |
| 20-40 | 5,2 | 5,8 | 1,7 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 3,6 | 60,6 | 7,3 | 89,7 | 0,8 |

^a pH dans une suspension sol:eau ou sol:KCl 1 M de 1:2,5 ; ^b Carbone total (Walkley-Black) ; ^c Azote total Kjeldahl ; ^d Bases échangeables et CEC déterminés par la méthode Tucker à pH 7,0 ; ^e éléments totaux : HNO₃ 11 N puis HClO₄ 6 N (4 h à ébullition) ; ^f voir plus loin.

L'expérimentation au champ est conduite depuis 1994 avec du maïs (*Zea mays* L., cvs. Hycorn 80 en 1994 et 1995, cv. Hycorn 83 en 1996), selon un dispositif en carré latin 5*5. Le facteur contrôlé est le P appliqué en juin 1994, sous forme de phosphate supertriple, aux doses de 4, 6, 8, 10 et 12 t ha⁻¹ de P₂O₅. Il a été apporté manuellement sur le sol nu de chacune des 25 sous-parcelles de 60 m², puis enfoui à l'aide d'une charrue à disque sur 30 cm. De la croûte calcaire (1,5 t ha⁻¹) a été épandue la première année pour relever le pH du sol. Hormis P pour la première année, chaque cycle de culture a reçu de l'urée et du sulfate de potassium pour assurer les besoins du maïs. Une irrigation a permis d'apporter la quantité d'eau nécessaire à la plante. Le maïs a été semé à la densité de 66666 pieds ha⁻¹, le 25 juillet 1994 pour le 1^{er} cycle, le 10 mai 1995 pour le 2^e, et le 3 juillet 1996 pour le 3^e. Chaque cycle a duré environ 165 jours.

Après le second cycle de culture au champ, une expérimentation en serre a été conduite pour vérifier l'intérêt d'apporter à nouveau du P : du sol a ainsi été prélevé fin 95 – sans perturber le champ - sur 25 cm sur les parcelles qui avaient reçu en 1994 4, 8 et 12 t P₂O₅ ha⁻¹. A ces trois niveaux de fertilisation initiale ont été apportés quatre doses de phosphate supertriple : 0, 2, 4 et 6 t P₂O₅ ha⁻¹. Le dispositif était un essai factoriel à deux facteurs principaux, donnant par combinaison 12 traitements, et à 12 répétitions. Les sols ont été tamisés à 6 mm, homogénéisés et mélangés avec l'apport complémentaire de P avant le remplissage des pots (5,4 kg de sol pot⁻¹). Une fertilisation complète a été apportée pour éviter toute déficience (mg kg⁻¹ de sol : 200 N, 64 K, 100 S, 1,3 B, 2 Zn, 3 Cu, 0,3 Mo). L'essai a été conduit avec du maïs (*Zea mays* L., cv. Hycorn 83) pendant 35 jours.

Le matériel végétal récolté a été séché à 105 °C pendant 44 h, avant d'être pesé puis broyé à 0,5 mm. Pour l'analyse, les échantillons ont été calcinés puis attaqués par HCl concentré. P a été dosé par colorimétrie à 420 nm selon la méthode au vanadomolybdate. Pour la détermination du P total du sol, P a été extrait par fusion à la soude. Il a été dosé par colorimétrie du complexe phosphomolybdique à 820 nm. Pour le P assimilable du sol, la méthode de Olsen modifiée a été utilisée (Olsen *et al.*, 1954) : P a été extrait par une solution de fluorure d'ammonium et d'hydrogénocarbonate de sodium 0,5 M, puis déterminé par colorimétrie du complexe phosphomolybdique réduit à 880 nm. Les résultats des expérimentations ont été soumis à l'analyse de variance. La signification des différences entre les moyennes a été déterminée à l'aide du test t de student au seuil de 5%.

Résultats

Les sols ferrallitiques ferritiques ont naturellement une très faible réserve en P et une teneur en P assimilable quasiment nulle (Tab. 1). Leurs teneurs en oxydes de fer sont par contre très fortes.

Au cours de l'essai en plein champ, l'apport de P₂O₅ a permis d'augmenter fortement la teneur en P assimilable du sol (Fig. 1). On constate toutefois qu'elle a diminué nettement de 1994 à 1996. Les rendements en grains des maïs cultivés sur ces sols étaient satisfaisants en 1994, avec peu de différences entre les traitements (Fig. 2). En 1995, on constate une forte diminution des rendements avec 4 t ha⁻¹. En 1996, tous les rendements ont chuté de façon considérable, avec quand même une augmentation avec l'apport de P. D'après le tableau 2, cette chute de rendement en grains était due à une diminution du poids de 1000 grains, du nombre d'épis par plant et du nombre de grains par épis. De la même façon, les poids de matière sèche des tiges et feuilles ont augmenté légèrement avec l'apport de P au cours du 1^{er} cycle, nettement au 2^e cycle, alors qu'au 3^e les poids étaient faibles pour les faibles apports. Les teneurs en P dans les parties aériennes étaient globalement satisfaisantes en 1994 (Tab. 2). Elles étaient moins élevées en 1995, surtout avec les faibles apports de P₂O₅. En 1996, ces teneurs étaient plus fortes.

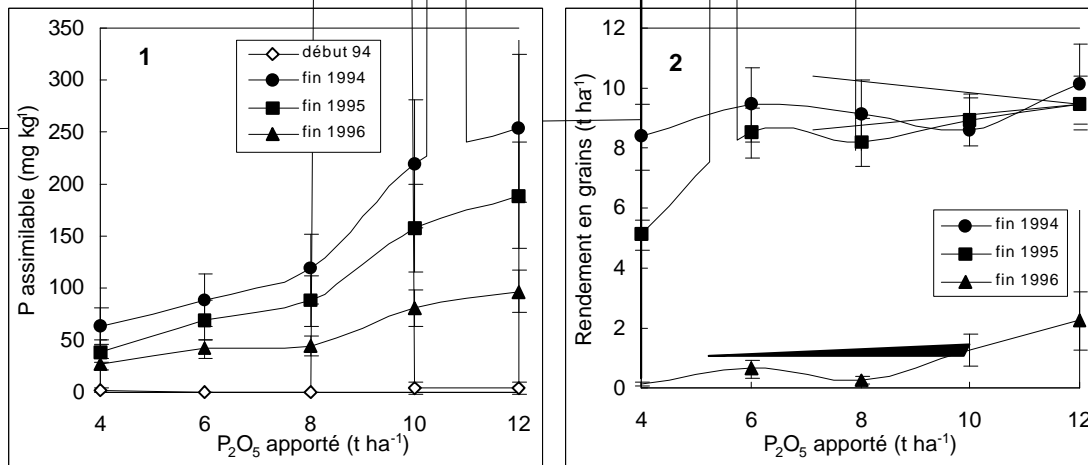
D'une façon générale, des symptômes de carence en P chez le maïs ont été observés, plus ou moins fortement selon le développement des plants.

L'expérimentation en serre a permis de constater que les apports complémentaires de P₂O₅, sur les parcelles du champ qui en avaient reçu deux ans auparavant, ont amélioré significativement la croissance des maïs : il n'y a que la dose de 6 t ha⁻¹ sur le sol ayant déjà reçu 12 t ha⁻¹ qui a montré un plateau (Fig. 3). Ceci est corrélé avec l'augmentation des teneurs en P dans les parties aériennes (Fig. 4).

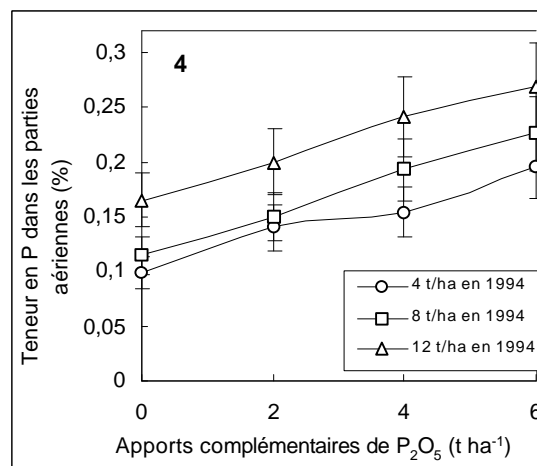
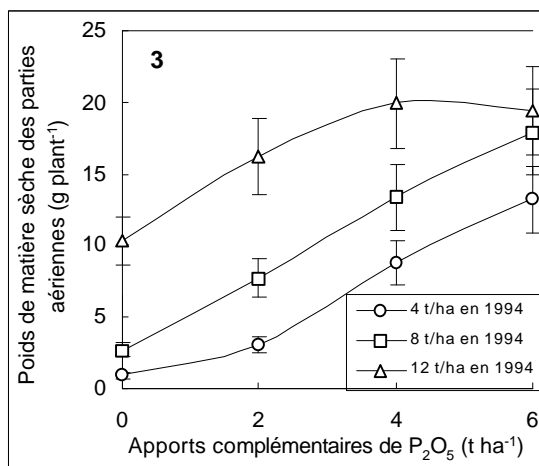
Tableau 2. Paramètres du rendement et teneur en P des parties aériennes des maïs de l'expérimentation au champ.

| Paramètre | Année | Apports de P ₂ O ₅ effectués en 1994 (t ha ⁻¹) | | | | |
|---|-------|--|---------|--------|--------|--------|
| | | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| Poids de 1000 grains (g) | 94 | 326,8a | 348,6a | 335,5a | 335,1a | 351,1a |
| | 95 | 228,7a | 273,9b | 281,5b | 273,4b | 298,2b |
| | 96 | 127,7a | 131,0a | 131,1a | 180,3a | 215,7a |
| Nombre d'épis par plant | 94 | 1,0a | 1,1a | 1,1a | 1,1a | 1,1a |
| | 95 | 0,9a | 1,0b | 1,0b | 1,0b | 1,1b |
| | 96 | 0,3a | 0,6b | 0,5c | 0,8d | 0,8d |
| Nombre de grains par épis | 94 | 299,0a | 299,6a | 295,6a | 287,8a | 306,7a |
| | 95 | 223,9a | 321,1b | 272,5c | 327,0b | 313,3b |
| | 96 | 36,3a | 110,7bc | 64,9ab | 154,9c | 228,4c |
| Poids de matière sèche des tiges et feuilles (g plant ⁻¹) | 94 | 63,3a | 69,8ab | 70,6ab | 80,8c | 72,5b |
| | 95 | 83,2a | 121,0b | 123,8b | 156,7c | 159,1c |
| | 96 | 36,0a | 56,3b | 49,0ab | 72,6c | 73,9c |
| Teneur en P dans les parties aériennes (%) | 94 | 0,21a | 0,25b | 0,25b | 0,26b | 0,27b |
| | 95 | 0,13a | 0,15b | 0,14b | 0,15b | 0,16c |
| | 96 | 0,18a | 0,18a | 0,19a | 0,20a | 0,20a |

Des lettres différentes sur une ligne indiquent une différence significative au seuil de 5 %.



Figures 1, 2. Phosphore assimilable avant culture et en fin de chaque cycle (horizon 0-20 cm) (1) et rendement commercial (15 % d'humidité) en grains de maïs des trois cycles de culture (2) en fonction du P apporté en 1994 sur le champ expérimental.



Figures 3, 4. Poids de matière sèche (3) et teneur en phosphore (4) des parties aériennes des maïs cultivés en serre en fonction d'apports complémentaires de phosphore sur trois sols du champ expérimental qui ont reçu du phosphore 2 ans avant (4, 8 et 12 t ha⁻¹).

Discussion

Les résultats déjà observés auparavant en serre (Gourdon *et al.*, 1992 ; Capart et Bonzon, 1993) ont été retrouvés et précisés dans cette expérimentation : il a été nécessaire d'apporter au moins 4 t ha⁻¹ de P₂O₅ pour conduire correctement un cycle de culture de maïs, et au moins 6 t ha⁻¹ pour deux cycles consécutifs (Figs. 1, 2 ; Tab. 2). Pour un 3^e cycle, même un apport de 12 t ha⁻¹ n'a pas été suffisant, les ions phosphates s'étant probablement fixés progressivement de manière très puissante.

Les faibles rendements en grains observés pour les apports de P les plus faibles étaient bien dus à une carence en P du maïs : aucun autre élément nutritif ne s'est révélé déficient lors de l'analyse (résultats non montrés), alors que la teneur en P dans les parties aériennes était souvent inférieure à 0,2 % - teneur considérée comme normale pour ce stade dans la littérature (Jones, 1983) - et que des symptômes de carence en P étaient observés au cours du développement. Les teneurs en P des parties aériennes relativement élevées lors du 3^e cycle (Tab. 2) étaient la conséquence du faible développement végétatif pour les faibles apports de P.

L'apport complémentaire de P après deux cycles de culture a permis d'améliorer à nouveau le développement du maïs : il a fallu alors apporter au moins 6 t ha⁻¹ de P₂O₅ aux sols qui avaient déjà reçu 4 et 8 t ha⁻¹, et au moins 2 t ha⁻¹ à celui qui avait reçu 12 t ha⁻¹ (Figs. 3, 4).

Ces sols ont donc des capacités considérables pour fixer P énergiquement. De plus, la fixation est très rapide, l'apport de 4 t P₂O₅ ha⁻¹ ne permettant d'assurer qu'un seul cycle.

Des études au laboratoire sur ces sols ont montré qu'ils étaient capables de fixer au moins 9000 mg P kg⁻¹ (soit 61,8 t ha⁻¹ de P₂O₅), caractéristique exceptionnelle comparée à de nombreux autres sols (Dubus *et al.*, 1998). Ces auteurs ont montré que les constituants impliqués sont surtout les oxydes de fer et d'aluminium.

Il a été montré que de fortes fertilisations phosphatées étaient également nécessaires sur d'autres sols oxydiques, mais à un degré moindre : des rendements optimaux ont été obtenus durant 9 ans avec une seule application massive de 3 t P₂O₅ ha⁻¹ sur un Oxisol de

Hawaii (Fox *et al.*, 1971). Par contre un apport de 2,3 t P₂O₅ ha⁻¹ sur un Ultisol de Hawaii s'est révélé insuffisant pour maintenir la fertilité du sol au-delà d'un cycle de culture de soja (Linquist *et al.*, 1996). D'autres auteurs ont étudié l'intérêt d'apporter un seul apport massif de P sur des Oxisols (Kamprath, 1967).

Dans de telles conditions, la recherche de moyens de limiter la fixation de P ou de mieux utiliser les faibles réserves de P disponibles est primordiale. Cette étude a montré qu'il était certainement préférable de fractionner les apports de P, l'apport le plus faible ayant donné de bons résultats sur un cycle. Cela a été constaté par ailleurs (Linquist *et al.*, 1996), et les agriculteurs de la région procèdent empiriquement de la même manière en apportant sur ces sols des quantités importantes de fertilisant à chaque cycle. Une récente étude sur ces sols a montré qu'il était préférable d'avoir un délai très court entre l'apport de P et le semis (Muneret et Laubreaux, 1997). Des apports localisés de P ont également été étudiés (Yost *et al.*, 1979). Il semble que les mycorhizes permettent souvent d'améliorer l'absorption de phosphate par de nombreux végétaux (Nurlaeny *et al.*, 1996). Une augmentation du pH est un moyen souvent utilisé pour diminuer la fixation de P en diminuant le nombre de sites de fixation des oxydes de fer (Fageria *et al.*, 1995). L'apport d'engrais vert, de compost, peut être intéressant également en retardant la fixation de P (Afif *et al.*, 1995; Dubus, 1998). Enfin, il existe une grande variabilité intra- et inter-spécifique entre les végétaux dans la capacité à exploiter P dans des sols où il est peu disponible (Gahoonia and Nielsen, 1996 ; Fageria *et al.*, 1995). L'expérimentation au champ présentée ici se poursuit actuellement. Le 4^e cycle de maïs doit être récolté début janvier 1998, et un 5^e cycle sera lancé vers le mois de juin 1998.

Références bibliographiques

- Afif E., Barron V. and Torrent J. 1995. Organic matter delays but not prevent phosphate sorption by Cerrado soils from Brazil. *Soil Sci.* 159: 207-211.
- Borggaard O. K. 1983. The influence of iron oxides on phosphate adsorption by soil. *J. Soil Sci.* 34: 283-297.
- Capart I. et Bonzon B. 1993. Mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Effets de doses croissantes d'amendements phosphaté sur laitue et haricot. Orstom, Nouméa, Conv. Sci. Vie, Agropedol. 21, 58 pp.
- Dubus, I. 1998. Phosphorus sorption in two Geric ferralsols of New Caledonia. 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, 20-26 août 1998, Symposium n. 6.
- Fageria N. K., Zimmermann F. J. P. and Baligar V. C. 1995. Lime and phosphorus interactions on growth and nutrient uptake by upland rice, wheat, common bean and corn in an Oxisol. *J. Plant Nutr.* 18: 2519-2532.
- Fox R. L., Hasan S. M. and Jones R. C. 1971. Phosphate and sulfate sorption by latosols. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Eval. 1857-1864.
- Gahoonia T. S. and Nielsen N. E. 1996. Variation in acquisition of soil phosphorus among wheat and barley genotypes. *Plant and Soil* 178: 223-230.
- Gourdon F., Boucaron C. et Bonzon B. 1992. Interaction phosphore-silice et influence de la matière organique : résultats de la troisième et la quatrième étude en serre. Orstom, Nouméa, Conv. Sci. Vie, Agropedol. 14, 60 pp.
- Jones C. A. 1983. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Res.* 6: 133-142.

- Kamprath E. J. 1967. Residual effects of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. *Agron. J.* 71: 925-926.
- Latham M., P. Quantin et G. Aubert. 1978. Étude des sols de la Nouvelle-Calédonie. Notice explicative n° 78, ORSTOM, Paris.
- Linguist B. A., Singleton P. W., Cassman K. G. and Keane K. 1996. Residual phosphorus and long-term management strategies for an Ultisol. *Plant and Soil* 184: 47-55.
- McLaughlin J. R., Ryden J. C. and Syers J. K. 1981. Sorption of inorganic phosphate by iron- and aluminium-containing components. *J. Soil Sci.* 32: 365-377.
- Muneret S. et Laubreaux P. 1997. Évolution de la fixation par un sol ferrallitique ferritique du Sud de la Grande Terre de doses croissantes de phosphore. Rapport de stage, CREA, 19 pp.
- Munns D. N. and Fox R. L. 1976. The slow reactions which continues after phosphate adsorption : kinetics and equilibrium in some tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 46-51.
- Nurlaeny N., Marschner H. and George E. 1996. Effects of liming and mycorrhizal colonization on soil phosphate depletion and phosphate uptake by maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.) grown in two tropical acid soils. *Plant and Soil* 181: 275-285.
- Olsen S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U. S. Dep. of Agric. Circ. 939.
- Uehara G. and Gillmann G. 1981. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder, Colorado, USA. 170 pp.
- Yost R. S., Kamprath E. J., Lobato E. and Naderman G. 1979. Phosphorus response of corn on an Oxisol as influenced by rates and placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 338-343.

Mots clés : phosphore, carence, fixation, sols ferrallitiques ferritiques, roches ultrabasiques, Nouvelle-Calédonie.

Keywords : phosphorus, deficiency, sorption, Oxisols, Geric Ferralsols, ultramafic rocks, New Caledonia.