Journal of Applied Biosciences 118: 11754-11767

ISSN 1997-5902

Effets de la fertilisation organo-phosphatée sur la biodisponibilité du phosphore, la teneur en aluminium et le ph des sols sous cacaoyers dans la région de Divo en Côte d'ivoire.

Ouattara TV[1], Kassin KE[2], Koko LJ[3], Tahi GN, Assi ME[2], Amari G, Dick E[1], Camara M[2]
1 Université Félix Houphouët Boigny (UFHB)
2 Centre National de Recherche Agronomique
3 Office Chérifien du Phosphate (OCP)
Auteur principal : Ouattara Tiéba Victor e-mail : ouattara_20@yahoo.fr

Original submitted in on 19th September 2017. Published online at www.m.elewa.org on 30th October 2017 https://dx.doi.org/10.4314/jab.v118i1.2

RESUME
Objectif : Une étude a été conduite sur une période de deux ans, à la station de recherche sur le cacao du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) à Divo, en vue d'évaluer la biodisponibilité du phosphore dans les sols dans le cas de la replantation cacaoyère.
Méthodologie et résultats : Le dispositif expérimental était un bloc de Fisher à 4 répétitions avec 6 traitements étudiés : T_0 (témoin), T_1 (compost), T_2 (compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5), T_3 (compost + 122,6 kg. ha^{-1} P_2O_5), T_4 (compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5) et T_5 (184 kg. ha^{-1} P_2O_5). La biodisponibilité du phosphore a été évaluée par la mesure d'indicateurs de fertilité phosphatée (phosphores total et assimilable, concentration en ions phosphates), de l'aluminium échangeable et du pH eau dans les couches du sol d'épaisseurs 0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 cm. Les expériences de sorption ont été réalisées uniquement sur les échantillons de sols de la couche 0-20 cm. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les traitements T2 (compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5), T3 (compost + 122,6 kg. ha^{-1} P_2O_5) et T4 (compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5). En revanche, le traitement T1 (compost) a contribué significativement à augmenter le pH et à réduire les teneurs de l'aluminium échangeable dans les sols.
Conclusion et application : Cette étude a montré que la nutrition phosphatée des cacaoyers replantés peut être assurée convenablement avec une fertilisation organo-phosphatée à base de compost et d'une faible dose de TSP. Ces résultats pourraient être utilisés par les producteurs de cacao pour une replantation réussie durable et respectant l'environnement.
Mots clés : Cacaoyer, biodisponibilité, fertilisation organo-phosphatée, ions phosphates, sorption-désorption, teneur en aluminium.

Effects of organo-phosphorus fertilizer on phosphorus bioavailability, aluminum uptake and ph in soil under cocoa trees in the region of Divo in Côte d'Ivoire

ABSTRACT

Objective : A study was conducted for two years at the Cocoa Research Station (CNRA) in Divo, to assess the bioavailability of phosphorus in the soils of cocoa trees replantation.

Methodology and results : The experimental design is a randomized block design with for replications and six treatments: T0 (control), T1 (compost), T2 (compost + 184 kg. ha-1 P2O5), T3 (compost + 122.6 kg. ha-1 P2O5), T4 (compost + 92 kg. ha-1 P2O5) and T5 (184 kg. ha-1 P2O5). P bioavailability was assessed by measuring phosphate fertility indicators (total phosphorus and assimilable then concentration of phosphate ions), exchangeable Al and pH water in the soil layers 0-5, 5 -10, 10-15 and 15-20 cm. Sorption experiments were performed only on the layer 0-20 cm. The best results are obtained with T2 (compost + 184 kg. ha-1 P2O5), T3 (compost + 122.6 kg. ha-1 P2O5) and T4 (compost + 92 kg. ha-1 P2O5). In contrast T1 has contributed significantly to increase the pH and reduce concentrations of exchangeable aluminum in the soil.

Conclusion and application of finding : This study shows that the phosphate nutrition of replanted cocoa trees can be ensured properly with organophosphate fertilization based compost and a low dose of TSP. These results will be used by producers for successful and sustainable replanting environmentally

Keywords: Cocoa trees, bioavailability, organo- phosphate fertilizer, phosphate ions, sorption - desorption, aluminum uptake.

INTRODUCTION

Le contexte de la cacaoculture en Côte d'Ivoire est actuellement marqué par la disparition de la forêt, naturellement utilisée par les producteurs comme le précédent cultural idéal pour la culture du cacaoyer (Gockowski & Sonwa, 2010). Face à cette situation, les producteurs cherchent de nouvelles aires cultivables ne respectant pas forcément la condition de forêt comme précédent cultural. Ce sont principalement, les vieilles plantations de cacaoyers ou de caféiers et les jachères naturelles. Il en résulte une installation difficile des cacaoyères (Assiri *et al*., 2015), de même qu'une baisse rapide de la productivité. Dans les sols de ces précédents, il se produit une diminution des principaux éléments nutritifs du sol et particulièrement, le phosphore (Assiri *et al*., 2015). Cette baisse de fertilité est accentuée par l'utilisation de nouveaux hybrides hauts producteurs Par la suite, les sols deviennent plus acides, provoquant des interférences pour la disponibilité et l'assimilation des éléments majeurs comme le phosphore (Stroia *et al.,* 2011). En effet, dans ces sols, le problème de l'adsorption de P et de l'inefficacité des engrais phosphatés a été prouvé car, 85-90 % des fertilisants phosphatés inorganiques qui, appliqués dans les sols acides, deviennent indisponibles pour les plantes au cours de l'année de leur apport. Cette observation découle de l'adsorption et de la précipitation de P avec les hydroxydes de fer, d'aluminium et de calcium dans le sol (Messiga *et al.,* 2013). Pour remédier à cette situation, la pratique du chaulage permettrait de faire remonter le pH du sol et précipiter l'aluminium échangeable, afin de réduire l'effet de la toxicité aluminique sur la disponibilité du P dans les sols acides. Mais, cette pratique nécessite de grandes quantités de carbonate de calcium ($CaCO_3$), de l'ordre de 2 à 10 t/ha ; ce qui n'est pas toujours accessible aux petits producteurs. La disponibilité de P pour les plantes peut être améliorée par l'application d'amendements organiques ou inorganiques tels que les fumiers, les composts, les phosphates naturels ou les divers engrais phosphatés inorganiques commercialisés. Plusieurs travaux ont montré que l'application d'amendements organiques d'origines végétale ou animale dans les sols acides, peut contribuer à augmenter le pH

et améliorer la croissance et le développement des jeunes cacaoyers (Adejobi *et al*., 2014). C'est dans ce contexte que cette étude de fertilisation phosphatée des sols sous cacaoyers a été initiée à la station de recherche du Centre National de Recherche Agronomique de Divo. Elle avait pour objectif, de déterminer l'effet de la fertilisation organo-phosphatée sous cacaoyères issues de jachère, sur la biodisponibilité en P, la teneur en aluminium échangeable et le pH des sols.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zone d'étude : L'expérimentation a été conduite à la station de recherche du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Divo dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Les coordonnées géographiques sont $05^0$46.198' latitude nord et $005^0$14.207' longitude ouest. La température de la zone de l'étude est de l'ordre de 27 à 28°C, avec une pluviométrie annuelle de 1200 mm en moyenne. Les sols sont des Ferrasols issus de granite fortement désaturés (kassin *et al.,* 2009). La parcelle d'essai a été installée sur une jachère de 3 années à base de *Chromolaena odorata* après abattage d'une vieille cacaoyère.

Matériel végétal : Le matériel végétal était constitué d'un mélange de sept hybrides de cacaoyers caractérisés par leur précocité de production, la qualité de leur fève et leur bon rendement de l'ordre de 2 à 2,4 t/ha

Matériel édaphique : Le matériel édaphique était composé d'échantillons de sols issus de la parcelle étudiée.

Fertilisants : Le triple superphosphate (TSP) à 46 p.c. de P_2O_5 et un compost de résidus d'écabossage ont été utilisés comme fertilisants. Le compost a été obtenu à partir de résidus d'écabossage (2/3) et de fiente de volaille (1/3), après 3 mois de compostage en andain. Les analyses chimiques effectuées sur ce compost au laboratoire, ont donné la composition chimique suivante: N = 1 pc. P_2O_5 = 1 pc. ; K_2O = 4 pc. ; CaO = 1,7 pc. ; MgO = 0,5 pc.

Méthodes

Dispositif expérimental : L'essai a été conduit sur une superficie de 0,9 ha selon un dispositif expérimental en bloc de Fisher, avec six traitements à quatre répétitions. Les traitements ont été répartis de manière aléatoire dans chaque bloc de 102 m sur 10 m. Ces blocs ont été disposés parallèlement et espacés de 10 m les uns des autres. Les parcelles élémentaires ont été constituées chacune de 30 cacaoyers espacés de 3 m sur 2,5 m (densité de 1333 plants/ha). Des plants de bananiers, mis en terre 8 mois avant les cacaoyers, en interligne et à la même densité de1333/ha, ont servi d'ombrage temporaire.

Traitements : Les différents traitements appliqués sont consignés dans le tableau 1 ci-dessous.

Les apports ont été faits en surface chaque année aux pieds des cacaoyers, en couronne dans un rayon situé à 0,60 m du collet des arbres. L'application a été faite en deux périodes avril (1/2) et septembre (1/2) de la dose totale.

Échantillonnage du sol : Les échantillons de sol ont été prélevés dans les couches 0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 cm avec un tube cylindrique de sondage avant la mise en place de l'essai et 18 mois après plantation des cacaoyers. Pour le précédent cultural, dix carottes de sol ont été prélevées au hasard dans chaque couche puis regroupées et soigneusement mélangées afin de constituer les échantillons composites par couche. Pour la parcelle d'essai, dix carottes de sol ont été prélevées au hasard sous dix cacaoyers à 0,6 m du pied des arbres, dans chaque couche puis regroupées et soigneusement mélangées afin de constituer les échantillons composites par couche et par parcelle élémentaire. Un total de 24 échantillons composites (quatre couches x six traitements) a ainsi été prélevé dans la parcelle d'essai. Les sols prélevés ont été séchés à l'air libre avant d'être tamisés à l'aide d'un tamis à mailles carrées de 2 mm de côté puis conservés dans des sachets plastiques pour les analyses chimiques au laboratoire.

Analyses chimiques des échantillons de sols : Les analyses chimiques des sols ont été effectuées selon les méthodes conventionnelles. Les principaux paramètres et éléments chimiques déterminés ont été les suivants : phosphores total et assimilable, concentration en ions phosphates et la sorption.

Tableau 1 : Doses (kg) et composition des différents fertilisants appliqués.

Traitements	Composition par ha	Doses par fertilisant (kg)					
		N ha^{-1} apporté sous forme de compost	P_2O_5 ha^{-1} sous forme de TSP	P_2O_5 ha^{-1} sous forme de compost	K_2O sous forme de compost	CaO sous forme de compost	MgO sous forme de compost
T0	Sans apport	0	0	0	0	0	0
T1	4 kg de compost/pied (5,33 t / ha^{-1})	52	0	52	208	88	26
T2	T1 + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5	52	184	52	208	88	26
T3	T1 + 122 kg. ha^{-1} P_2O_5	52	122	52	208	88	26
T4	T1 + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5	52	92	52	208	88	26
T5	184 kg. ha^{-1} P_2O_5	0	184	0	0	0	0

- **Dosage des phosphores total et assimilable des sols :** Le phosphore assimilable a été extrait selon la méthode Olsen modifiée Dabin (Dabin, 1967) et déterminé par colorimétrie à la longueur d'onde de 882 nm (Murphy & Riley, 1962). Le dosage du phosphore total a été effectué par la méthode colorimétrique au bleu de molybdène, après attaque à l'acide nitro-perchlorique (Olsen & Sommers 1982).
- **Dosage des ions phosphates dans la solution du sol (Cp) :** La méthode d'extraction à l'eau a été utilisée pour le dosage des ions phosphates. Cette méthode permet d'évaluer une concentration en ions phosphates proche de celle existant dans la solution du sol et de déterminer les seuils de carence. Les analyses ont été réalisées sur les échantillons des quatre couches de sol (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm). Ces échantillons de sols ont passé 30 min dans un autoclave à 120 ^{0}C et à la pression de 1 bar puis mis en suspension dans de l'eau distillée (1g/10 ml ; m/v) en agitation pendant 16 h. Une aliquote de suspension a été prélevée à l'aide d'une seringue médicale de 5 ml et filtrée à l'aide de filtres jetables en acétate de cellulose de pores de 0,2 µm de diamètre. La concentration des ions phosphates de la solution du sol (Cp) a été déterminée par dosage au vert-malachite. L'intensité de la couleur du complexe formé a été mesurée au spectrocolorimètre à la longueur d'onde de 610 nm. Cp a été obtenue à partir de la gamme étalon (Guivarch *et al.,* 2001 ; Rabehariosa, 2004)
- **Transfert net d'ions phosphates à l'interface solide-solution par des expériences de sorption-désorption :** Le principe a consisté à mettre en contact sous agitation pendant 48 heures une faible quantité de sol et une solution de phosphore à des concentrations croissantes 10, 20, 30, 40, 100, 200, 300 et 400 mgP.L^{-1} correspondant respectivement aux apports de 80 kg. ha^{-1} P_2O_5, 160 kg. ha^{-1} P_2O_5, 240 kg. ha^{-1} P_2O_5, 320 kg. ha^{-1} P_2O_5, 800 kg. ha^{-1} P_2O_5, 1600 kg. ha^{-1} P_2O_5, 2400 kg. ha^{-1} P_2O_5 et 3200 kg. ha^{-1} P_2O_5. La concentration en ions phosphates (Cp) du sol a été déterminée par la méthode colorimétrique au vert-malachite. Les analyses ont été réalisées uniquement sur les échantillons de l'horizon 0-20 cm. La détermination des concentrations en ions phosphates (Cp) de la solution a permis de calculer la quantité d'ions adsorbés (Psd) par les particules du sol selon la formule suivante :

Psd = (Cpi – Cpf) V/M,

Où : Cpi représente la concentration initiale des ions phosphates en l'absence de sol (mgP.L^{-1}) ; Cpf, la concentration finale en présence de sol (mgP.L^{-1}) et V/M, le volume de solution par masse de sol (cm^3/g) (Guivarch *et al.,* 2001 ; Rabehariosa, 2004).

- **pH :** L'acidité du sol a été évaluée par la mesure du pH-eau dans un rapport m/v = 1/2,5 à l'aide d'un pH-mètre de marque SCOTT GERATE.
- **Dosage de l'aluminium échangeable :** L'aluminium échangeable a été extrait du sol par la méthode d'extraction au KCl (Bache & Sharp, 1976). Avec une solution normale de chlorure de potassium, les ions aluminiums adsorbés par les particules du sol ont été déplacés par les ions potassium (K+) en excès en saturant le complexe absorbant par mise en contact. Par suite, le dosage des ions a été fait par spectrométrie d'absorption atomique à la longueur d'onde de 309,3 nm. Le mode opératoire a été le suivant : Une masse de 5 g de sol tamisé a été mise dans un godet de 50 ml en présence de 25 ml d'une solution normale de chlorure de potassium. Le mélange a été agité pendant 30 min puis centrifugé pendant 5 min à 3000 tours/min. Un volume de 100 ml du surnageant a permis de doser l'aluminium échangeable au spectrophotomètre d'absorption atomique à la longueur d'onde de 309,3 nm.

Mobilité du phosphore dans les différentes couches du sol : La mobilité du phosphore a été déterminée par la relation suivante :

RTPHi = [Tpi / (Tp0-5 + Tp5-10 + Tp10-15 + Tp15-20)] x 100

ou

RCPHi = [Cpi / (Cp0-5 + Cp5-10 + Cp10-15 + Cp15-20)] x 100

RTPH et RCPH étant respectivement, les pourcentages de phosphore et de la concentration en ions phosphates pour chaque traitement dans un horizon donné ; i, l'horizon considéré ; Tp et Cp étant respectivement, la teneur en phosphore et la concentration en ions phosphates dans la solution du sol des différents horizons étudiés (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm).

Pouvoir fixateur des particules du sol dans les différentes couches en fonction des traitements : Le pouvoir fixateur des particules du sol a été défini par le rapport entre les phosphores assimilable et total ($P._{assimilable}$ / $P._{total}$). Ce rapport donne une estimation de la disponibilité des ions phosphates pour les plantes (Rabehariosa, 2004).

Analyses statistiques : Les échantillons de sols ont été analysés sur la base de trois répétitions par traitement. Les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide de la procédure GLM du logiciel SAS 9.2. Le test de Newman et Keuls a été utilisé pour la comparaison des moyennes. Les régressions ont été faites à l'aide du logiciel STATGRAPHICS plus 2000.

RESULTATS

Teneurs en phosphores total et assimilable et concentration des ions phosphates en solution (Cp) des différentes couches du sol : L'analyse des teneurs en phosphore total et assimilable du sol et de la concentration en ions phosphates de la solution du sol a révélé pour les quatre couches étudiées, des différences significatives entre les traitements (tableau 2).-Pour le phosphore total, le traitement T2 (Compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5) a permis d'obtenir les plus fortes teneurs dans les deux premières couches avec 3177 ppm (0-5 cm) et 1765 ppm (5-10 cm). Dans les deux couches sous-jacentes (10-15 et 15-20 cm), le traitement T5 (184 kg. ha^{-1} P_2O_5) avec 1365 ppm (10-15 cm) et 1247 ppm (15-20 cm), a induit les plus fortes teneurs. La plus faible teneur (47 à 235 ppm) en phosphore total a été obtenue avec le traitement T0 sur toute la longueur du profil. Pour le phosphore assimilable, le traitement T2 (Compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5) a donné la plus forte teneur en phosphore assimilable dans la première couche (0-5) avec 647 ppm. Dans les trois couches sous-jacentes (5-10, 10-15 et 15-20 cm), le traitement T5 (184 kg. ha^{-1} P_2O_5) a produit les plus fortes teneurs en phosphore assimilable. Dans les trois premières couches de surfaces (0-5, 5-10 et 10-15 cm), les teneurs en phosphore assimilable ont été les plus faibles variant de 71 à 12 ppm alors que dans la dernière couche (15-20 cm), les traitements T3 (compost + 122 kg. ha^{-1} P_2O_5) et T4 (compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5) ont donné la plus faible teneur avec 6 ppm. Concernant la concentration en ions phosphates dans la solution du sol (Cp), le traitement T2 (Compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5) a permis d'obtenir les valeurs les plus élevées dans les deux premières couches avec 0,452 $mgP.L^{-1}$ (0-5 cm) et 0,174 $mgP.L^{-1}$ (5-10 cm). En revanche, dans les deux couches sous-jacentes (10-15 et 15-20 cm), le traitement T5 (184 kg. ha^{-1} P_2O_5) avec 0,05 $mgP.L^{-1}$ (10-15 cm) et 0,02 $mgP.L^{-1}$ (15-20 cm) a donné les valeurs les plus élevées. La plus faible Cp a été obtenue avec le traitement T0 quelle que soit la couche, avec des concentrations comprises entre 0,003 et 0,002 $mgP.L^{-1}$.

Répartition des formes de phosphore dans les différentes couches du sol en fonction des régimes de fertilisation : L'analyse de la répartition des différentes formes de phosphore et du pouvoir fixateur des particules du sol a montré des écarts significatifs entre les traitements pour les couches étudiées (tableau 3).

- **Répartition du phosphore total dans chaque couche par traitement :** L'accumulation du phosphore total a été forte pour le traitement T0 dans les deux premières couches avec 38,4 p.c. (0-5 cm) et 34,6 p.c. (5-10 cm), alors qu'elle l'a été pour T1, dans les deux couches sous-jacentes (10-15 et 15-20 cm) avec des pourcentages variant de 24,2 à 23,6 p.c.
- **Répartition du phosphore assimilable dans chaque couche par traitement :** L'accumulation du phosphore assimilable a été importante pour T4 dans la couche 0-5 cm avec 75,2 p.c., pour T0 dans la couche 5-10 cm avec 38,3 p.c. et pour T5 dans les deux dernières couches (10-15 et 15-20 cm) avec respectivement 13,5 et 8,5 p.c. Dans les trois dernières couches, l'accumulation a été la plus faible, particulièrement pour le traitement T4.

Répartition des ions phosphates dans chaque couche par traitement : L'accumulation des ions phosphates a été forte pour T4 dans la couche 0-5 cm avec 75,2 p.c. Par contre, la distribution des ions phosphates dans les trois couches inférieures (5-10, 10-15 et 15-20 cm) avec respectivement 27,3 p.c., 27,3 p.c. et 18 p.c. a été importante pour T0. Dans ces mêmes couches et dans la strate supérieure les valeurs les plus faibles ont été relevées respectivement avec les traitements T4 et T0.

Pouvoir fixateur des particules du sol dans les différentes couches en fonction des régimes de fertilisation : Le pouvoir fixateur a été le plus élevé pour T1 dans les deux premières couches (0-5 et 5-10 cm) avec respectivement des valeurs de 0,11 et 0,04. Dans les deux couches suivantes (10-15 et 15-20 cm), le pouvoir fixateur le plus important a été observé pour les traitements T1, T2, T3 et T4. Par contre, il a été faible (0,32) dans la couche 0-5 cm pour T4, tout comme observé également dans l'ensemble des couches avec le traitement T0.

Tableau 2. Teneurs en phosphore et concentration en ions phosphates de la solution des sols sous l'effet de la fertilisation organo-phosphatée

Traitements	Phosphore total (ppm) par couche				Phosphore assimilable (ppm) par couche				Concentration en ions phosphates ($mgP.L^{-1}$) par couche			
	0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	5-10	10-15	15-20
T0	235f	212 d	118c	47 d	71e	59e	12d	12b	0,003e	0,003d	0,003d	0,002d
T1	1153e	1082 c	1035b	1012c	129d	47e	12d	12b	0,015d	0,003d	0,003d	0,002d
T2	3177a	1765a	1271a	1177b	647a	341b	65b	18b	0,452a	0,174a	0,032b	0,012b
T3	2612b	1459 b	1153b	1035c	582b	294c	71b	6c	0,24b	0,095b	0,019c	0,006c
T4	1812 d	1153 c	1106b	1012c	571b	147d	35c	6c	0,258b	0,052c	0,022b	0,011b
T5	2165 c	1529b	1365 a	1247a	541c	376a	159a	100a	0,214c	0,119a	0,05a	0,02a

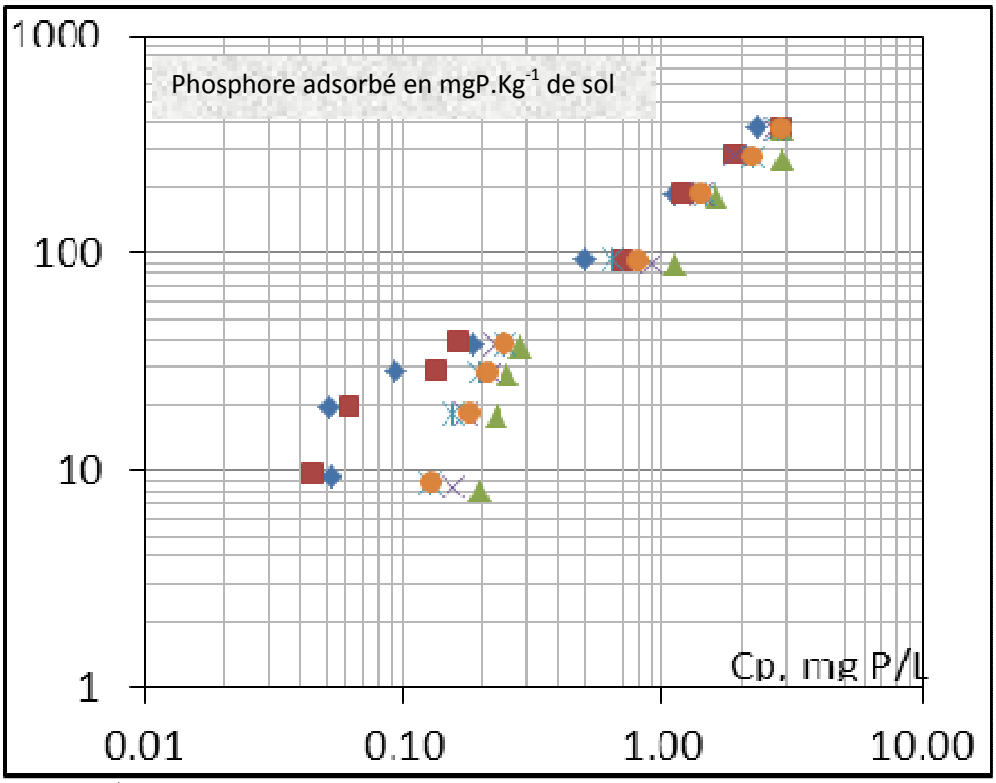
* Dans une colonne, les moyennes suivies d'une même lettre, sont statistiquement identiques au seuil de 5 p.c. (Newman-Keuls).
T0 (témoins sans apport) ; **T1** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost) ; **T2** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T3** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost + 122,6 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T4** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T5** (184 kg. ha^{-1} P_2O_5)

Tableau 3. Mobilité des différentes formes de phosphore et pouvoirs fixateurs des particules dans les différentes couches du sol en fonction des traitements

Traitements	Répartition du phosphore total (p.c.) par couche				Répartition du phosphore assimilable (p.c.) par couche				répartition des ions phosphates de la solution du sol (p.c.) par couche				Pouvoir fixateur des particules du sol par couche			
	0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	5-10	10-15	15-20
T0	38,4 a	34,6 a	19,3 c	7,7 f	46,1 d	38,3 a	7,8 b	7,8 b	27,4 d	27,3 a	27,3 a	18 a	0,3 0 a	0,28 a	0,25 a	0,1 a
T1	26,9 c	25,3 b	24,2 a	23,6 a	64,5 ab	23,5 cd	6 b	6 ab	62,5ab	12,5 b	12,5 ab	12,5 ab	0,11 c	0,04 f	0,01 bcd	0,012 b
T2	43 a	23,9 bc	17,2 d	15,9 e	60,4 c	31,8 ab	6,1 b	1,7 c	67,2ab	26,2 a	4,8 b	1,8 c	0,2 b	0,19 cd	0,05 bc	0,015 b
T3	41,7 a	23,3 cd	18,4 c	16,5 de	61 c	30,9 ab	7,5 b	0,6 d	67ab	26 a	5,3 b	1,7 c	0,22 b	0,2 cd	0,06 bcd	0,006 b
T4	35,6 ab	22,7 cd	21,8 c	19,9 b	75,2 a	19,4 d	4,6 b	0,7 d	75,2 a	15,2 b	6,4 b	3,2 c	0,32 a	0,13 e	0,03 bcd	0,006 b
T5	34,3 ab	24,3 bc	21,6 b	19,8 bc	46 d	32ab	13,5 a	8,5 a	53,6 c	29 a	12,4 ab	5 b	0,25 b	0,25 ab	0,12 ab	0,08 a

* Dans une colonne, les moyennes suivies d'une même lettre, sont statistiquement identiques au seuil de 5 p.c. (Newman-Keuls).
T0 (témoins sans apport) ; **T1** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost) ; **T2** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T3** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost + 122,6 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T4** (5,33 $t.ha^{-1}$ de compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T5** (184 kg. ha^{-1} P_2O_5)

Capacité d'adsorption des ions phosphates par les particules du sol dans la couche 0-20 cm : Pour le témoin avec une faible Cp initiale (0,003 mgP.L^{-1}), la mise en contact des particules du sol avec les solutions de concentrations 10 mgP.L^{-1} et 20 mgP.L^{-1}, a montré une adsorption totale (10 mg P.kg^{-1} de sol) des ions phosphates présents dans la solution du sol par les particules. Pour une Cp de 30 mgP.L^{-1} l'adsorption a été partielle (25 mg P.kg^{-1} de sol). L'optimum de 0,2 mgP.L^{-1} n'a été atteint que pour une mise en contact des particules du sol avec une solution de 35 mgP.L^{-1} (figure 1). Pour le sol ayant reçu du compost avec une faible Cp initiale de 0,015 mgP.L^{-1}, la mise en contact des particules du sol avec les solutions de concentrations 10 mgP.L^{-1} et 20 mgP.L^{-1}, a montré une forte adsorption (10 mg P.kg^{-1} de sol et 30 mg P.kg^{-1} de sol) des ions phosphates présents dans la solution du sol par les particules. Pour la concentration de 30 mgP.L^{-1} on a eu une Cp d'environ 0,2 mgP.L^{-1} avec une capacité d'adsorption de 40 mg P.kg^{-1} de sol. Pour les sols ayant reçu du compost + 122 kg. ha^{-1} P_2O_5, compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5 et 184 kg. ha^{-1} P_2O_5, la mise en contact des particules du sol avec les solutions de concentration 10 mgP.L^{-1}, a montré, relativement une forte adsorption des ions phosphates présents dans la solution du sol par les particules (environ 8 mg P.kg^{-1} de sol) avec une Cp d'environ 0,2 mgP.L^{-1} (figure 1). Pour les sols ayant reçu du compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5, la mise en contact des particules avec les solutions de concentrations 10 mgP.L^{-1}, a montré une adsorption relativement faible des ions phosphates présents dans la solution du sol par les particules (7,5 mg P.kg^{-1} de sol) avec une Cp de 0,25 mgP.L^{-1} (figure 1).



Légende : ◆ Témoin ; ■ Compost ; ▲ Compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5; × Compost + 122 kg. ha^{-1} P_2O_5; ✕ Compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5; ● 184 kg. ha^{-1} P_2O_5.

Figure 1. Capacité de sorption évaluée par la quantité nette d'ions phosphates transférés entre la solution et la phase solide des sols en fonction des apports d'ions phosphates dans la solution après 48 h de mise en contact

Évolution du pH eau des sols dans les différentes couches en fonction des traitements : L'analyse des données de pH a montré une variation entre les traitements pour les couches étudiées (tableau 4). Les valeurs du pH des sols traités ont été statistiquement supérieures ou égales à celles du témoin absolu T0. En revanche, par traitement, une baisse de pH a été enregistrée des couches superficielles vers les couches sous-jacentes. Toutefois, pour les couches superficielles, les valeurs du pH les plus élevées ont été obtenues avec le traitement T1.

Évolution des teneurs en aluminium échangeable dans les différentes couches du sol en fonction des traitements. : Concernant l'aluminium échangeable, à l'exception de T5, tous les autres traitements ont induit une baisse significative des teneurs dans toutes les couches de sol par rapport au témoin absolu. En effet, les teneurs en aluminium échangeable dans les couches de sol suite à l'application de T5 ont été supérieures à celles des autres traitements hormis T0. Cependant, pour tous les traitements, un gradient d'aluminium échangeable a été observé des horizons de surface vers ceux en profondeur. Le traitement T1 a occasionné les teneurs en aluminium échangeable les plus faibles, quelle que soit la couche de sol (tableau 4).

Tableau 4 : pH eau et teneurs en aluminium échangeable des sols en fonction des traitements de fertilisation

Traitements	**pH eau par couche**				**Aluminium échangeable (cmol (+) kg^{-1}) par couche**			
	0-5 cm	5-10 cm	10-15 cm	15-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-15 cm	15-20 cm
T0	5,3 c	5,2 b	5,1 c	5,1 b	2,89 a	3,2 a	3,42 a	3,8 a
T1	6,7 a	6,2 a	5,4 b	5,2 b	1,95 c	2,06 d	2,16 e	2,32 e
T2	5,4 c	5,2 b	5,1 c	5,1 b	2,35 b	2,42 b	2,45 d	2,56 d
T3	5,9 b	5,6 b	5,5 b	5,5 a	2,48 b	2,51 b	2,65 c	2,94 b
T4	6,2 b	5,5 b	5,9 a	5,3 b	2,65 a	2,71 c	2,68 c	2,77 c
T5	6,0 b	5,1 b	5,0 c	5,0 b	2,95 a	2,98 a	3,05 b	3,10 b

* Dans une colonne, les moyennes suivies d'une même lettre sont statistiquement identiques au seuil de 5 p.c. (Newman-Keuls).

T0 (témoins sans apport) ; **T1** (5,33 t.ha^{-1} de compost) ; **T2** (5,33 t.ha^{-1} de compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T3** (5,33 t.ha^{-1} de compost + 122,6 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T4** (5,33 t.ha^{-1} de compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5) ; **T5** (184 kg. ha^{-1} P_2O_5)

DISCUSSION

Effets de la fertilisation organo-phosphatée sur les teneurs en phosphore *et al*uminium échangeable, la concentration en ions phosphates de la solution du sol (Cp) et le pH dans les sols : Des faibles teneurs initiales en phosphore (P. total de T0 = 235 ppm, P. assimilable = 71 ppm) ainsi que des faibles concentrations (0,003 mgP.L^{-1}) de l'ion phosphate en solution ont été observés dans les sols étudiés. Cette faible disponibilité du phosphore (Cp faible) dans les sols ferralitiques tropicaux sur socle granitique a déjà été montrée dans de nombreuses études (Messiga *et al*., 2015)**.** Compaoré en 1996, avait fixé un seuil minimum de Cp = 0,2 mgP.L^{-1} de solution pour une alimentation non limitante des plantes. Bien que le traitement minéral seul (T5) ait contribué à l'élévation de la teneur en phosphore (phosphore total et phosphore assimilable), celle-ci a été nettement influencée par l'apport de fertilisants organo-minéraux. En effet, la teneur en phosphore a été améliorée, en particulier par les applications de compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5 et surtout de compost + 122 kg. ha^{-1} P_2O_5. Ces résultats traduisent implicitement que la minéralisation de la matière organique aurait libéré du phosphore qui se serait ajouté aux teneurs initiales du sol en phosphore et à celles de l'engrais minéral phosphaté. Les résultats corroborent ceux des travaux déjà réalisés par divers auteurs (Messiga *et al*., 2011 ; Ziadi *et al*., 2013), qui ont montré une contribution significative du phosphore organique dans l'amélioration de la teneur en phosphore des sols. L'étude a également mis en évidence la présence d'une forte concentration des ions phosphates dans la solution du sol pour les traitements organo-minéraux par rapport aux témoins absolu T0 (sans apport de

fertilisants) et au témoin relatif T5 (184 kg. ha^{-1} P_2O_5). Le compost a donc contribué à améliorer la disponibilité du phosphore dans le sol en complexant les oxyhydroxydes d'aluminium et de fer, pour libérer les ions phosphates dans la solution du sol, comme l'ont montré les travaux de Messiga *et al.* (2013). En outre, la matière organique a contribué également à l'élévation du pH (Adejobi *et al.* 2014). La forte teneur en ions phosphates dans la solution du sol, engendrée par la combinaison du compost et du TSP, résulterait non seulement, de la contribution du phosphore issu de la matière organique minéralisée au cours de l'expérimentation (Messiga *et al*., 2010a), mais aussi, de l'engrais minéral (TSP) qui a une grande solubilité dans l'eau**.** Par ailleurs, deux voies (minéralisation par les phosphatases et micorhyzation des ectomycorhizes) pourraient expliquer la concentration élevée en ions phosphates au niveau du sol ayant reçu le compost seul (plassard *et al.,* 2015). Toutefois, cette teneur en ions phosphates est inférieure à l'optimum qui est 0,2 $mgP.L^{-1}$; ce qui aurait pour conséquence une nutrition insuffisante et une baisse substantielle de la production chez le cacaoyer.

Répartition des formes de phosphore dans les différentes couches du sol sous l'influence d'apport organique : Une variabilité de la répartition du phosphore total a été observée à travers les différentes-couches du sol suite à l'apport de la matière organique. Pour l'ensemble des traitements, l'accumulation du phosphore biodisponible (teneurs en phosphore assimilable et en ions phosphates) a été importante dans l'horizon de surface (0-5 cm). Les résultats de cette étude sont comparables à ceux de Borges & Mallarino, (2000) et Watson & Matthews, (2008) qui ont montré que la teneur en phosphore dans les profondeurs de labour (0-5) est nettement plus élevée que dans les horizons sous-jacents. Par ailleurs, les traitements organiques (T1) et organo-minéraux, et particulièrement à faible proportion en engrais minéraux (T4), ont contribué à une forte rétention superficielle du phosphore. La teneur élevée du phosphore dans la couche du sol 0-5 cm pourrait être le fait de la faible dose d'engrais associée au compost qui stimulerait l'activité des mycorhizes et des bactéries, (Karazawa & Tabeke, 2012 ; Plassard *et al.* 2015). Selon Sari *et al*., (2002), les mycorhizes amélioreraient la disponibilité du phosphore des engrais chimiques.

Pouvoir fixateur des particules du sol dans les différentes couches sous l'influence d'apport organique : La fixation des ions phosphates sur les particules du sol a été forte pour les traitements organo-minéraux et organiques seuls. Elle se ferait entre les feuillets d'argiles retenus par la matière organique, par des liaisons organométalliques et organocalciques. Cette grande réactivité des particules du sol vis-à-vis des ions phosphates retarde leur migration en profondeur, d'où les fortes concentrations observées en surface. Morel *et al.*, '(2004), ont observé une forte réactivité du phosphore dans un sol ayant reçu massivement du lisier et qui avait retardé sa migration en profondeur. Les concentrations en ions phosphates, très élevées en surface et très faibles dans les profondeurs du sol, corroborent cette hypothèse.

Effet de la fertilisation organo-phosphatée sur la capacité d'adsorption des ions phosphates de la solution des particules du sol : Pour tous les sols traités, la concentration en ions phosphates a été améliorée. Pour atteindre la concentration optimale (0,2 $mgP.L^{-1}$ de solution du sol), il a fallu un apport de 280 kg. ha^{-1} P_2O_5 pour le sol témoin ou 235 kg. ha^{-1} P_2O_5 pour le sol déjà fertilisé avec du compost seul. L'adsorption a donc été plus importante dans le sol du témoin absolu que dans celui ayant reçu du compost. Des résultats similaires ont été déjà mentionnés par Richardson *et al*., (2009). Dans le sol ayant reçu un mélange de compost et de TSP (compost + 184 kg. ha^{-1} P_2O_5), la concentration en ions phosphates de la solution du sol a été supérieure à celle générée par l'engrais minéral seul apporté à forte dose (T5) par un ajout de 10 $mgP.L^{-1}$ de solution. Cette concentration de mise en contact correspond à un apport de fertilisant de 80 kg. ha^{-1} P_2O_5. Ainsi, il ne semble plus utile de continuer le régime de fertilisation comme au départ qui augmenterait certes la fraction biodisponible, mais placerait la plante dans une situation de consommation de luxe et déséquilibrerait la chimie du sol initial. Pour atteindre le niveau de concentration en ions phosphates dans la solution du sol de T2, il aurait fallu encore un régime de fertilisation de 120 kg. ha^{-1} P_2O_5. Par ailleurs, avec les doses rationnelles de TSP et de compost (T3 et T4), les teneurs en ions phosphates dans la solution du sol ont atteint l'optimum qui est de 0,2 $mgP.L^{-1}$, tout comme l'engrais minéral seul (T5). Cet apport a été égal à un régime de fertilisation de 80 kg. ha^{-1} P_2O_5. Les fertilisations constituées de compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5 (T4) et à un degré moindre de compost + 122 kg. ha^{-1} P_2O_5 (T3) se sont bien approchées de l'optimum de concentration en ions phosphates.

CONCLUSION

Les analyses des résultats de l'étude ont révélé un faible niveau de fertilité phosphatée initiale des sols (T0) du site de l'essai. La répartition des ions phosphates et leur fixation dans les couches du sol ont été importantes en surface (couche 0-5 cm) pour T1 (compost seul) et les apports organominéraux, surtout pour T4 (compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5). L'application du compost seul (T1) a augmenté le pH du sol et réduit la teneur en aluminium échangeable. Les expériences de sorption ont montré que pour atteindre la teneur optimale de 0,2 $mgP.L^{-1}$ en ions phosphates dans la solution du sol, nécessaire pour une alimentation non limitante des plantes, l'on devrait impérativement 'apporter au sol, 280 kg. ha^{-1} P_2O_5 dans les sols témoins sans apport de fertilisants (T0) et 235 kg. ha^{-1} P_2O_5 dans les sols ayant reçu le compost seul (T1). Quant aux traitements T3 (compost + 122 kg. ha^{-1} P_2O_5), T4 (compost + 92 kg. ha^{-1} P_2O_5) et T5 (184 kg. ha^{-1} P_2O_5), les applications ont été de 80 kg. ha^{-1} P_2O_5. S'agissant des sols du T2, une application de 64 kg. ha^{-1} P_2O_5 a été nécessaire pour atteindre la teneur optimale nécessaire en ions phosphates dans la solution du sol. Le dosage de la concentration en ions phosphates ainsi que leurs expériences de sorption par les particules du sol ont été pertinents, même s'ils semblent de moins en moins pris en compte dans de telles études.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adejobi KB, Akanbi OS, Ugioro O, Adeosun SA, Mohammed I, Nduka BA, Adeniyi DO 2014. Comparative effects of NPK fertilizer, cowpea pod husk and some tree crops wastes on soil, leaf chemical properties and growth performance of cocoa (*Theobroma cacao* L.). African Journal of Plant Science 8 : 103-107.

Assiri AA, Konan A, N'Guessan KF, Kébé BI, Kassin KF, Couloud JY, Yapo AR, Yoro GR, Yao-Kouamé A 2015. Comparaison de deux techniques de replantation cacaoyère sur antécédents culturaux non forestiers en côte d'ivoire. African Crop Science Journal 23: 365 – 378.

Bache BW, Sharp GS, 1976. Caractérisation of aluminium in acid soils. Geoderma 15: 91-101.

Borges R. et Mallarino AP 2000. Grain yield, early growth, and nutrient uptake of no-till soybean as affected by phosphorus and potassium placement. Agronomy Journal 92: 380-388.

Chen CR, Condron LM, Davis MR, Sherlock RR 2002. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial rye-grass (Lolium perenne L.) and radiata pine (Pinus radiata D. Don.). Soil Biology & Biochemistry 34 : 487-499.

Compaoré E, 1996. Contribution à la caractérisation et à la gestion de la fertilité phosphatée de quelques sols ferrugineux tropicaux. Institut national polytechnique, Thèse de doctorat, Lorraine, France, 144 pp.

Dabin B, 1967. Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, Madagascar, 19-25 novembre 1 : 99-115.

Gockowski J. et Sonwa DJ 2010. Cocoa Intensification Scenarios and Their Predicted Impact on CO_2 Emissions, Biodiversity Conservation, and Rural Livelihoods in the Guinea Rain Forest of West Africa. Environnemental Management 8 : 307-321.

Guivarch A, 2001. Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines. Institut National de la Recherche Agronomique (Unité d'Agronomie), Thèse de Doctorat, Bordeaux, France, 306 pp.

Karazawa, T., Tabeke, M., 2012. Temporal or spatial arrangements of cover crops to promote arbuscular mycorrhizal colonization and P uptake of upland crops grown after nonmycorrhizal crops. Plant and Soil 353 : 355–366.

Kassin KE, 2009. Etudes de conditions pédoclimatiques pour la replantation cacaoyère au centre-ouest de la Côte d'Ivoire: cas des départements de Divo et Gagnoa. Thèse de Doctorat unique, UFR STRM, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 112 pp.

Messiga AJ, Ziadi N, Mollier A, Parent LE, Schneider A, Morel C, 2015. Process-based mass balance modeling of soil phosphorus availability:

Testing different scenarios in a long-term maize monoculture. Geoderma 41-49.

Messiga AJ, Ziadi N, Be´langer G, Morel C 2013. Soil nutrient and other major properties in grassland fertilized with nitrogen and phosphorus. Soil Science Society of America Journal 77: 643–652.

Messiga AJ, Ziadi N, Angers DA, Morel C, Parent LE 2011. Tillage practices of a clay loam soil affect soil aggregation and associated C and P concentrations. Geoderma 164 : 225–231.

Messiga AJ, Ziadi N, Plénet D, Morel C, Parent LE 2010a. Soil phosphorus availability in no-till versus conventional tillage following freezing and thawing cycles. Canadian Journal of Soil Science 90 : 419–428.

Morel C, Cachot C, Martinez J, Peu P, Elsass F, Robert M, Fardeau J-Cl 2004. Evolution sur 12 ans de la solubilité, mobilité et lixiviation du phosphate dans un sol ayant massivement reçu du lisier. Etude et Gestion des Sols 11 : 187-201.

Murphy J. et Riley JP 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta 27: 31–36.

Olsen SR. et Sommers LE 1982. Phosphorus. *in*. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, 403-427.

Plassard C, Robin A, Le Cadre E, Marsden C, Trap J, Herrmann L, Waithaisong K, Lesueur D, Blanchart E, Chapuis-Lardy L, Hinsinger P 2015. Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? Innovations Agronomiques 43 : 115-138

Rabehariosa L, 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes terres de Madagascar. Thèse d'Etat, Science du sol, Université d'Antananarivo, Madagascar, 192 pp.

Richardson AE, Barea JM, McNeill AM, Prigent-Combaret C 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. Plant and Soil 321: 305-339.

Sari N, Ortas I, Yetisir H 2002. Effect of mycorhiza inoculation on plant growth, yield, and phosphorus uptake in garlic under field conditions. Communications in Soil Science and Plant Analysis 33: 2189-2201.

Stroia C, Morel C, Jouany C 2011. Effect of nitrogen fertilization on grassland soil acidification: consequences on diffusive phosphorus dynamics. Soil Science Society of America Journal 75: 112-120.

Watson CJ. et Matthews DI 2008. A 10-year study of phosphorus balances and the impact of grazed grassland on total P redistribution within the soil profile. European Journal of Soil Science 59 : 1171–1176.

Ziadi N, Whalen JK, Messiga AJ, Morel C 2013. Assessment and Modeling of Soil Available Phosphorus in Sustainable Cropping Systems. Advances in Agronomy 122: 85-126.