

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 42

1997

Étude du statut et de la capacité de fixation
du phosphore dans les sols ferrallitiques
ferritiques du sud de la Grande Terre

Igor DUBUS
Bernard BONZON

Convention Province Sud / ORSTOM
N° 294-PVF/DDR notifiée le 5 novembre 1996
Avenant n° 1 du 5/11/1996

CONVENTION
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 42

1997

**Étude du statut et de la capacité de fixation
du phosphore dans les sols ferrallitiques ferritiques
du sud de la Grande Terre**

Igor DUBUS
Bernard BONZON

Convention Province Sud / ORSTOM
N° 294-PVF/DDR notifiée le 5 novembre 1996
Avenant n°1 du 5/11/1996



**L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION**

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1997

/Dubus, I.
/Bonzon, B.

Étude du statut et de la capacité de fixation du phosphore dans les sols ferrallitiques
ferritiques du sud de la Grande Terre

Nouméa : ORSTOM. juillet 1997. 31 p.
Conv. Scie Vie ; Agropédol. ; 42

SOL FERRALLITIQUE FERRITIQUE ; PHOSPHORE ; OXYDES ET HYDROXYDES DE FER ET
D'ALUMINIUM ; SORPTION ; ADSORPTION ; DESORPTION ; CINETIQUE ; ISOTHERME /
NOUVELLE CALEDONIE

Imprimé par le Centre ORSTOM
Juillet 1997



ORSTOM Nouméa
REPROGRAPHIE

Résumé

Ce rapport présente les résultats d'une étude visant à évaluer la capacité de fixation du phosphore, par les sols ferralitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie, après une fertilisation phosphatée préalable. Des échantillons de sol qui avaient reçu 2, 6 et 10 t ha⁻¹ de P₂O₅ ont été prélevés sur le champ expérimental de Ouénarou. Il on reçu un apport complémentaire de 0, 2, 4 et 6 t ha⁻¹ de P₂O₅, et ont été mis à incuber, à la capacité au champs, pendant 2, 19 ou 72 jours. Leur capacité à fixer le phosphore a été déterminée par l'établissement des isothermes d'adsorption.

L'augmentation des apports de phosphore, au champ comme en serre, entraîne une diminution de sa capacité d'adsorption et induit, en conséquence, une augmentation de son assimilabilité. Les apports successifs ont montré que la fixation devenait de plus en plus intense au cours du temps : la fraction du phosphore apporté en serre contribue une fois et demi plus au phosphore assimilable que le phosphore apporté 20 mois auparavant au champ. Il n'a pas pu être observé de diminution de l'assimilabilité du phosphore avec le temps d'incubation en serre (2 à 72 jours) dans les conditions des expériences, les processus impliqués étant relativement lents.

D'un point de vue pratique, ces expériences montrent que le phosphore est d'autant plus assimilable pour les plantes qu'il a été appliqué récemment. Le fractionnement des apports d'amendements phosphatés est donc souhaitable.

Avant-Propos

La capacité de rétention extrêmement élevée du phosphore par les oxydes métalliques du sol est un des problèmes majeurs rencontrés dans ce type de sol. Cette fixation induit une réduction de la fertilité des sols en limitant fortement la biodisponibilité du phosphore pour les cultures. Ce document a donc pour objectif d'analyser l'intensité de la fixation du phosphore apporté par les amendements phosphatés sur les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Ces expérimentations doivent fournir des éléments de réflexion sur les moyens de gérer ce problème

Ces recherches ont été conduites au titre de l'avenant 1 de la convention de recherche entre la Province Sud et l'ORSTOM pour "**l'étude de l'influence sur le comportement des plantes cultivées des contraintes chimiques et physiques des sols dérivés des massifs ultrabasiques**".

L'ensemble de ces travaux ont été menés à bien grâce à l'aide de l'équipe du CREA, sous la responsabilité de P. Laubreau, qui a assuré la mise en place et le suivi technique de l'expérimentation au champ de Ouénarou et à la participation de Joseph Ouckewen et Léon Taputuarai lors des expérimentations en serre et au champ

Les analyses chimiques ont été réalisées par l'Unité de Recherches et d'Analyses (URA) du CIRAD-Montpellier sous la responsabilité de M. Szwarc et par les personnels du Laboratoire Commun d'Analyse de l'ORSTOM-Nouméa sous la responsabilité de J.L. Duprey.

La duplication de ce rapport a été confiée à l'atelier de reprographie du Centre ORSTOM de Nouméa (responsable : J.P. Mermoud).

Sommaire

Introduction	7
<u>I. Protocole expérimental</u>	8
A. Site d'étude	8
B. Expérimentation au champ	8
C. Expérimentation en serre	8
D. Expérimentation au laboratoire	9
E. Dosage du phosphore total	10
<u>II. Résultats et discussion</u>	10
A. Dosage du phosphore total dans les sols et variabilité	10
A.1. Influence de l'expérimentateur sur le dosage du phosphore total	10
A.2. Répétabilité des mesures	11
A.3. Variation des résultats de dosages de phosphore total dans les sols dues aux méthodes et aux conditions de leur application	11
A.3.1. Variation des résultats due à la méthode de dosage	11
A.3.2. Variation des résultats liée aux laboratoires	15
B. Influence d'un apport de phosphore au champ ou en serre sur le phosphore total et assimilable	15
B.1. Vérification des apports effectués en serre et au champ	15
B.1.1. Apports de phosphore lors de l'expérience en serre	15
B.1.2. Apports de phosphore au champ	15
B.2. Evolution du phosphore total et assimilable en fonction des apports de phosphore au champ et en serre	17
B.2.1. Evolution du phosphore total en fonction des doses apportées	17
B.2.2. Variation du phosphore total en fonction du temps	17
B.2.3. Relation entre phosphore assimilable et phosphore total	21
B.2.4. Phosphore assimilable et fractionnement des apports	21
C. Influence d'un apport de phosphore au champ ou en serre sur la capacité de fixation du phosphore	24
C.1. Evolution de la capacité d'adsorption en fonction du temps	24
C.2. Evolution de la capacité d'adsorption en fonction des apports de phosphore	27

<u>III. Conclusions et perspectives</u>	30
Références citées	32

Etude du statut et de la capacité d'adsorption du phosphore dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Grande Terre

Les sols oxydiques du Sud de la Grande Terre sont classés dans les sols ferrallitiques ferritiques selon la classification française (C.P.C.S., 1967), dans les ferrallisols selon le référentiel pédologique français (R.P.F., 1990), dans les Acrorthox selon la Soil Taxonomy (USDA, 1960) et dans les acric Ferrallsols selon la classification FAO (FAO-UNESCO, 1974). Ils représentent le stade ultime de l'altération de roches ultramafiques.

Ces sols, de couleur rouge foncé à rouge sombre, sont généralement profonds, poreux et bien drainants. Leur texture est limono-argileuse avec, parfois, en surface un horizon gravillonnaire ou induré. Côté caractéristiques chimiques, ils présentent une certaine acidité (pH de 4,5 à 5,5), sont très riches en fer total (50 à 70% des éléments totaux) mais très pauvres en bases échangeables. Enfin, les capacités d'échanges anionique et cationique varient considérablement avec le pH (sols à charge variable).

De nombreuses contraintes existent en vue de la mise en valeur de ces sols. Ils présentent une structure fragile en surface, une pauvreté chimique très marquée, et une capacité de rétention du phosphore très importante, contrairement aux autres éléments fertilisants qui ne sont pratiquement pas fixés. Ils sont par ailleurs sensibles à l'érosion.

Les potentialités de ces sols à l'état naturel sont donc très limitées (Latham et al., 1978). Des reboisements sur massifs miniers et en plaine, et le développement de cultures à forte valeur ajoutée en plaine (maraîchage et arboriculture fruitière) ont toutefois été envisagés. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'apporter des amendements calcique (calcaire broyé ou gypse) pour tenter de réduire l'acidité ou le déséquilibre calco-magnésien et phosphaté pour contrecarrer l'effet de la fixation du phosphore, et enfin de fertiliser selon les besoins de la plante.

Les sols oxydiques du Sud couvrent environ un tiers de la surface de la Grande Terre et constituent une importante ressource de terres arables à proximité de Nouméa. Pour cette raison, la valorisation maraîchère de ces terres a été démarré il y a plus de 15 ans.

Le laboratoire d'Agropédologie de l'ORSTOM étudie depuis 1988 la fertilité de ces sols dans le cadre de conventions passées avec le Territoire, puis avec la Province Sud. La partie expérimentale en plein champ est réalisée sur le site d'expérimentation de Ouénarou, dans le Parc Provincial de la Rivière Bleue, qui a été choisi pour sa représentativité vis-à-vis des étendues de terres potentiellement cultivables.

L'objectif de cet essai était en premier lieu de confirmer le résultat d'essais sur vase de végétation qui fixait à 7 t P₂O₅/ha le niveau de fertilisation pour lequel on atteint un pallier dans les rendements, et d'autre part, de mettre en évidence une perte de disponibilité du phosphore pour les plantes au cours du temps (rétrogradation). Un essai en carré latin a donc été mis en place en juillet 1994 afin d'étudier les effets et arrières-effets de doses croissantes d'amendement phosphaté, sous forme de superphosphate, sur le sol et le rendement du maïs, pris comme plante-test. Le dépouillement des résultats des deux premières campagnes a révélé une variabilité importante, liée probablement aux variations des caractéristiques du sol sur la parcelle, à l'hétérogénéité de la répartition de la végétation originelle, à un mélange insuffisant des amendements dans les horizons (Bonzon et al., 1995), ainsi qu'à l'hétérogénéité d'un épierrage (P. Laubreaux, communication personnelle). Des échantillons de sol des différentes parcelles du carré latin ont été récoltés en novembre 1995 à la fin du deuxième cycle cultural et utilisés pour un essai en serre, dans lequel on a étudié l'influence d'apports complémentaires de phosphore sur le rendement du maïs. Une partie des expériences a été menée sans plante afin de mettre l'accent sur les relations sol-phosphore. Des expériences de laboratoire visant à déterminer la capacité de fixation du phosphore ont enfin été réalisées sur des échantillons de sol provenant de l'expérience en serre. La succession des expérimentations (champ, serre, laboratoire) va dans le sens d'une diminution de la variabilité liée à l'expérimentation mais les résultats finaux de laboratoire ne peuvent se révéler intéressants que si les expériences précédentes ont été bien menées.

I. Protocole expérimental

A. Site d'étude

La champ expérimental se situe dans la station forestière de Ouénarou, en bordure du Parc Provincial de la Rivière Bleue. Ce site a été étudié et décrit en détail (Bonzon et al., 1995).

B. Expérimentation au champ

L'expérimentation, sur laquelle porte l'étude de l'évolution des effets et arrières-effets de doses croissantes de phosphore, est de type "carré latin 5*5 à parcelle subdivisée une fois". Le facteur principal de cette expérimentation est le facteur "doses de P₂O₅ appliqué sous forme de superphosphate". Il comporte cinq niveaux : 2, 4, 6, 8, et 10 t/ha de P₂O₅.

C. Expérimentation en serre

Des échantillons de sol ont été prélevés en novembre 1995 à la fin du deuxième cycle de culture de l'expérience au champ, soit 16 mois après la fertilisation phosphatée, sur les parcelles ayant reçu des doses de phosphore de 2, 6, et 10 t P₂O₅ / ha. Les échantillons ont été tamisés, homogénéisés, puis stockés

pendant 3 mois à température ambiante. Après séchage à 40°C pendant 3 jours, ils ont été partitionnés en 64 échantillons de 5,4 kg, masse de terre nécessaire au remplissage des vases de végétation de hauteur et de diamètre respectif 28 et 15,4 cm. Des doses complémentaires de superphosphate correspondant à des apports de 0, 2, 4 et 6 tonnes de P₂O₅ par hectare (sur la base d'une densité au champ de 3000 tonnes de terre par ha) leur ont alors été incorporées à l'aide d'un mélangeur. Les échantillons ont ensuite été empotés, installés dans la serre et humidifiés pendant 15 jours. Des grains de maïs prégermés ont alors été semés, à raison d'un grain par pot. La croissance des plants a été suivie pendant 36 jours. Trois séries de pots correspondant aux diverses combinaisons d'apports initiaux au champ et complémentaires en serre, n'ont pas reçu de plante afin d'étudier en détail les relations sol-phosphore en s'affranchissant de la variabilité due au végétal. Chaque série de pots a subi des durées d'incubation différentes (mise à la capacité au champ pendant 2, 19, et 72 jours). Au terme de ces trois périodes, le contenu des pots a été séché à 40°C pendant 72 heures, avant dosage des quantités de phosphore assimilable par la méthode Olsen modifiée Dabin (Dabin, 1967) et de phosphore total (méthode par fusion alcaline et méthode triacide HF / HNO₃ / HClO₄).

D. Expérimentation en laboratoire

Les expériences menées visent à la détermination de la capacité de rétention du phosphore sur les échantillons provenant de l'expérience en serre.

Le protocole est le suivant : 1 gramme de sol ($\pm 0,001$ g) est mis en contact avec 10 ml de solutions de KH₂PO₄ préparées dans du chlorure de calcium (CaCl₂) 0,01M, de concentrations croissantes 0, 100, 200, 350, et 500 mg P l⁻¹. L'ensemble est mis à agiter par retournement (16 tours minute⁻¹, Bioblock Mini Drum Roller) à température ambiante (25 \pm 1°C). Au bout de 24h d'agitation, les tubes sont centrifugés à 2500 tours minute⁻¹, soit 1240xg, pendant 15 minutes (Centrifugeuse Jouan GT 4.11) et le surnageant est filtré (Schleicher et Schuell, 589³ Blauband). Les filtrats sont acidifiés par une goutte de HCl 0,1N pour limiter l'activité microbienne, avant d'être analysés par la méthode de coloration phosphomolybdique (Murphy et Riley, 1962).

La quantité de phosphore adsorbée sur les particules de sol X (mg kg⁻¹) s'obtient par différence entre les concentrations initiales C₀ et les concentrations à l'équilibre C_e après agitation, exprimées en mg l⁻¹ :

$$X = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{M},$$

où V est le volume de solution mise en contact avec le sol, en l, et M la masse de sol, en kg.

Les isothermes d'adsorption (ou relations Quantité-Intensité) expriment la relation entre la quantité de phosphore adsorbée sur le sol X (« concentration solide ») et la concentration de phosphore en solution C_e, en équilibre avec le sol, pour différentes concentrations initiales C₀. Elles peuvent être modélisées par

plusieurs équations, dont la plus adaptée dans notre cas, compte tenu de l'étendue de la gamme de concentrations, est l'équation de Freundlich s'exprimant de la manière suivante:

$$X = K_f \cdot C^{n_f},$$

où X est la quantité de phosphore adsorbée sur le sol, C la concentration à l'équilibre, et où K_f et n_f sont deux paramètres empiriques reflétant respectivement la capacité et l'intensité d'adsorption.

E. Dosage du phosphore total

Deux méthodes ont été utilisées :

- **Méthode alcaline « pseudo-totale »**

Le principe est de transformer le phosphore en phosphore alcalin soluble dans l'eau, par fusion à la soude. 5g de soude en pastille sont ajoutés à 0,5g de sol broyé à 200 μm dans un creuset de nickel. L'ensemble est mis à chauffer à 650°C pendant 30 min. Après refroidissement, le contenu solidifié du creuset est dissous par 100 ml d'eau distillée chaude, filtré, et rincé par de l'eau distillée. Le volume est alors ajusté à 250 ml à l'aide d'eau distillée. La solution est dosée par colorimétrie avec du molybdate d'ammonium et du tartrate d'antimoine et de potassium. Le dosage du complexe phosphomolybdique est effectué à la longueur d'onde λ de 660 nm. La mesure à 880 nm est plus sensible mais donne des résultats en excès pour le phosphore total (M. Szwarc, communication personnelle).

- **Méthode triacide « totale »**

Elle consiste à faire une attaque de 0,2g de sol tamisé à 100 μm par 5 ml de HNO_3 , 5 ml de HF, et 0,5 ml de HClO_4 dans des creusets de platine. Après digestion à froid pendant une nuit, on procède à une évaporation à sec (150-160°C) pendant 6 à 8 heures, puis à une reprise par 5 ml de HCl et 20 ml de H_2O pendant 15-20 min à chaud. On complète alors à 50 ml par de l'eau distillée. Le dosage du phosphore s'effectue par colorimétrie au bleu de molybdène à 660 nm. Cette méthode est totale mais dangereuse (manipulation d'acide fluorhydrique et perchlorique notamment).

II. Résultats et Discussion

A. Dosage du phosphore total dans les sols et variabilité

A.1. Influence de l'expérimentateur sur le dosage du phosphore total

Les dosages du phosphore total ont tout d'abord été réalisés par la méthode de fusion à la soude utilisée par le Laboratoire de Chimie de Nounéa. A la suite des résultats surprenants obtenus, un deuxième

dosage par la même méthode a été réalisé par un deuxième manipulateur plus habitué des dosages de phosphore. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1. Le premier expérimentateur semble avoir nettement surestimé les valeurs de phosphore total dans les échantillons, la surestimation variant de 4 à 24% selon les échantillons. Les écarts entre les expérimentateurs pour 72 jours d'incubation augmentent avec les doses de phosphore apportées au champ ($p=0,05$) sans qu'il soit possible d'expliquer cette tendance. **Les dosages de phosphore total par les laboratoires d'analyses doivent donc être, dans la mesure du possible, toujours réalisés par les mêmes personnes sous peine de courir le risque d'introduire un biais important dans les résultats.**

A.2. Répétabilité des mesures

Le tableau 2 présente les résultats de 12 répétitions de dosages du phosphore, effectuées sur les 12 échantillons issus de l'expérience en serre pour une durée d'incubation de 2 jours. Ces dosages ont été effectués par le laboratoire d'analyses URA du CIRAD à Montpellier par la méthode triacide.

Trois valeurs se distinguent nettement au sein des valeurs fournies et peuvent être considérées comme aberrantes, compte tenu des autres répétitions. **Les faibles valeurs des coefficients de variation** (rapport de l'écart-type sur la moyenne ramené en %) calculés sans ces valeurs **traduisent la bonne répétabilité des mesures**. Les coefficients de variation semblent augmenter pour les apports maximaux de phosphore en serre, sans qu'il soit possible de fournir une explication.

A.3. Variation des résultats de dosages de phosphore total dans les sols dues aux méthodes et aux conditions de leur application

Des différences importantes entre les résultats des dosages de phosphore total et les prévisions que l'on en faisait ont entraîné un certain nombre de vérifications.

A.3.1. Variation des résultats due à la méthode de dosage

Les méthodes comparées sont d'une part une attaque triacide totale par l'ajout d'acide fluorhydrique, nitrique et perchlorique (méthode totale), et d'autre part, une fusion alcaline à la soude (méthode pseudo-totale), avant dosage par colorimétrie de l'extrait. Ces deux méthodes ont été appliquées à l'ensemble des échantillons issus de l'expérience en serre et les résultats sont regroupés dans le tableau 3. Les différences entre les résultats issus des deux méthodes sont tantôt positives, tantôt négatives, mais l'examen de ce tableau amène à conclure que **les deux méthodes donnent des résultats voisins, à de rares exceptions près** (15% d'écart pour un échantillon). Ce résultat n'est pas applicable à d'autres types de sols sans vérification préalable.

Dose champ t P ₂ O ₅ /ha	Dose serre t P ₂ O ₅ /ha	2 jours d'incubation			19 jours d'incubation			72 jours d'incubation		
		Ptot exp. 1	Ptot exp. 2	Ecart (%)	Ptot exp. 1	Ptot exp. 2	Ecart (%)	Ptot exp. 1	Ptot exp. 2	Ecart (%)
2	0	1016	876	14	911	780	14	924	872	6
	2	1312	1138	13	1286	1129	12	1400	1286	8
	4	1722	1526	11	1857	1600	14	1727	1495	13
	6	2097	1827	13	2171	1897	13	2167	1827	16
6	0	1443	1256	13	1482	1312	11	1391	1269	9
	2	1914	1604	16	1897	1692	11	1757	1587	10
	4	2215	1966	11	2389	2023	15	2424	1993	18
	6	2612	2320	11	2703	2237	17	2773	2280	18
10	0	2049	1779	13	2206	1905	14	2154	1857	14
	2	2459	2171	12	2803	2237	20	2437	1931	21
	4	3021	2141	29	3226	2572	20	3130	2481	21
	6	3702	2860	23	3580	2830	21	3566	2756	23

Tableau 1. Influence de l'expérimentateur (1 et 2) sur le dosage du phosphore par la méthode alcaline

Les résultats sont exprimés en ppm de P

L'écart a été calculé selon la formule suivante : $Ecart = (P_{tot1} - P_{tot2}) / P_{tot1} * 100$

Dose champ tP ₂ O ₅ /ha	Dose serre tP ₂ O ₅ /ha	Rép. 1 ppm P	Rép. 2 ppm P	Rép. 3 ppm P	Rép. 4 ppm P	Rép. 5 ppm P	Rép. 6 ppm P	Rép. 7 ppm P	Rép. 8 ppm P	Rép. 9 ppm P	Rép. 10 ppm P	Rép. 11 ppm P	Rép. 12 ppm P	μ ppm P	σ ppm P	CV %
2	0	905	890	848	863	860	878	865	863	868	900	828	855	868 <i>a</i>	22	2.5
	2	1263	1128	1148	1205	1168	1220	1223	1180	1178	1193	1183	1140	1185 <i>b</i>	38	3.2
	4	1605	1615	1543	1545	1550	1555	1643	1595	1565	1523	1610	1613	1580 <i>c</i>	38	2.4
	6	1903	1863	1860	1935	1890	1820	1898	1738	1888	1923	2170	1870	1896 <i>d</i>	101	5.3
6	0	1295	1950	1295	1387	1300	1350	1318	1313	1330	1320	1313	1310	1321 <i>e</i>	27	2.1
	2	1560	1665	1570	1683	1648	1658	1620	1610	1628	1628	1670	2190	1631 <i>f</i>	40	2.4
	4	1978	2008	1983	2020	1975	2003	2013	1945	2010	2030	1913	1998	1989 <i>g</i>	34	1.7
	6	2238	1910	2228	2275	2205	2230	2213	2220	2265	2173	2113	2220	2191 <i>h</i>	98	4.5
10	0	1933	1863	1398	1855	1873	1888	1863	1840	1908	1873	1883	1853	1875 <i>d</i>	27	1.4
	2	2260	2118	2193	2198	2160	2208	2258	2183	2125	2165	2148	2183	2183 <i>h</i>	45	2.1
	4	2548	2445	2518	2513	2535	2520	2408	2495	2510	2528	2513	2450	2498 <i>i</i>	42	1.7
	6	2730	2740	2813	2813	2885	2800	2835	2753	2805	2810	3065	2763	2817 <i>j</i>	89	3.2

Tableau 2. Répétitions des dosages de phosphore total par l'URA de Montpellier sur les échantillons de serre ayant subi une incubation de 2 jours

Les valeurs en gras, considérées comme aberrantes, n'ont pas été prises en compte dans le calcul des moyennes et écarts-types

Les moyennes associées à des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5%

μ est la moyenne des répétitions, σ l'écart-type et CV le coefficient de variation ($\sigma/\mu*100$)

Dose champ t P ₂ O ₅ /ha	Dose serre t P ₂ O ₅ /ha	2 jours d'incubation					19 jours d'incubation			72 jours d'incubation		
		Attaque alcaline Nouméa	Attaque triacide Nouméa	Ecart Alca/Tria (%)	Attaque triacide Montp.	Ecart No/Mont (%)	Attaque alcaline Nouméa	Attaque triacide Nouméa	Ecart Alca/Tria (%)	Attaque alcaline Nouméa	Attaque triacide Nouméa	Ecart Alca/Tria (%)
2	0	876	876	0	868 (12)	-1	780	820	+5	872	894	+3
	2	1138	1099	-3	1185 (12)	+7	1129	1164	+3	1286	1269	-1
	4	1526	1469	-4	1580 (12)	+7	1600	1565	-2	1495	1495	0
	6	1827	1796	-2	1896 (12)	+5	1897	1857	-2	1827	1888	+3
6	0	1256	1225	-2	1321 (11)	+7	1312	1260	-4	1269	1321	+4
	2	1604	1591	-1	1631 (11)	+2	1692	1670	-1	1587	1622	+2
	4	1966	1866	-5	1989 (12)	+6	2023	2010	-1	1993	1949	-2
	6	2320	2232	-4	2191 (12)	-2	2237	2219	-1	2280	2276	0
10	0	1779	1792	+1	1875 (11)	+4	1905	1849	-3	1857	1870	+1
	2	2171	2106	-3	2183 (12)	+4	2237	2219	-1	1931	1918	-1
	4	2141	2455	+15	2498 (12)	+2	2572	2559	-1	2481	2551	+3
	6	2860	2865	0	2817 (12)	-2	2830	2838	0	2756	2764	0

Tableau 3. Influence de la méthode et du laboratoire d'analyses sur le dosage du phosphore total
Les résultats sont exprimés en ppm de P

Le nombre de répétitions pour les dosages de Montpellier sont indiqués entre parenthèses

Les écarts sont calculés de la façon suivante : $Ecart (A/B) = (B-A)/B * 100$

A.3.2. Variation des résultats liée aux laboratoires

L'attaque triacide sur les échantillons ayant subi une incubation de deux jours a été réalisée à la fois au Laboratoire Commun d'Analyses de l'ORSTOM Nouméa et à l'Unité d'Analyses du CIRAD Montpellier, ce qui permet une comparaison entre les laboratoires. **Les valeurs données par Montpellier sont légèrement supérieures à celles fournies par Nouméa.** Il est à noter que les valeurs fournies par Nouméa ne rentrent que dans 25% des cas dans les intervalles moyenne \pm écart-type obtenus à l'aide des répétitions effectués par Montpellier (tableaux 2 et 3).

B. Influence d'un apport de phosphore au champ ou en serre sur le phosphore total et assimilable

B.1. Vérification des apports effectués en serre et au champ

Les résultats des dosages de phosphore total dans l'ensemble des sols sont présentés dans les tableaux 2 et 3.

B.1.1. Apports de phosphore lors de l'expérience en serre

Les quantités de superphosphate mélangées à 5,4 kg de terre sèche ont été de 7,826 g pour la dose 2t/ha, 15,652g pour la dose de 4t/ha, et de 23,478g pour la dose de 6t/ha, ce qui représente des apports de 300,5 ppm, 601,0 ppm et 901,4 ppm de P respectivement, en se basant sur une teneur en P₂O₅ de 46% dans le superphosphate.

Les incréments relevés entre les doses en serre de 0, 2, 4, et 6 t P₂O₅/ha (tableau 3) permettent de calculer quel a été l'apport "réel" en phosphore dans chaque pot. La moyenne de ces apports est de 330,3 ppm pour une dose de 2t/ha. Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur théorique apportée par cette même dose (300,5 ppm). Cette faible différence pourrait s'expliquer par le fait que le sol utilisé n'avait pas été séché à 105°C.

B.1.2. Apports de phosphore au champ

L'examen des différences entre valeurs théoriques apportées au champ et valeurs observées à la fin des deux cycles culturaux (tableau 4') montre qu'il existe des différences importantes entre le premier et le second cycle cultural. Elles pourraient être mises en relation avec l'écart important de densités du sol après l'enfouissement initial de l'engrais et après la préparation du lit de semences du second cycle cultural.

Dose champ t P ₂ O ₅ /ha	Dose serre t P ₂ O ₅ /ha	Dose totale t P ₂ O ₅ /ha	P total ppm
2	4	6	1580 <i>a</i>
6	0		1321 <i>b</i>
2	6	8	1896 <i>c</i>
6	2		1631 <i>d</i>
6	4	10	1989 <i>e</i>
10	0		1875 <i>c</i>
6	6	12	2191 <i>f</i>
10	2		2183 <i>f</i>

Tableau 4. Comparaison des échantillons ayant reçu des quantités de phosphore totales identiques mais à des moments différents

Les valeurs associées à des lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5%

Quantités de P ₂ O ₅ appliquées (kg P ₂ O ₅ /ha)	2065	4130	6196	8261	10327	Moy.
Variations de teneur théoriques en ppm (d=1, h=30cm) ^{a,b}	300	601	901	1202	1502	901
Teneurs théoriques à la fin du 1er cycle ^a	383	688	999	1295	1597	992
Teneurs observées à la fin du 1er cycle ^a	911	1083	1308	1884	1969	1431
Teneurs observées à la fin du 2ème cycle ^a	776	1045	1227	1726	1791	1313
Différences entre valeurs théoriques et observées (fin 1er cycle) ^a	528	395	309	589	372	439
Différences entre valeurs théoriques et observées (fin 2ème cycle) ^a	393	357	228	431	194	321

Tableau 4'. Différences entre valeurs théoriques et observées de phosphore total

^a valeurs exprimées en ppm

^b d=densité apparente, h=profondeur d'enfouissement

Par ailleurs, le tableau 4' révèle un excès de 321 ppm de phosphore en moyenne, sur l'ensemble des parcelles du carré latin. Cette valeur correspondrait à peu près à un apport de 2 t P_2O_5 /ha. Peu de temps après l'application des 5 doses de superphosphate, un épandage de 2 t P_2O_5 /ha était programmé sur les aires situées à l'extérieur des bandes de culture et sur les allées. Il est très vraisemblable que cet épandage a été appliqué à la totalité du champ expérimental, ce qui expliquerait l'excès constaté.

B.2. Evolution du phosphore total et assimilable en fonction des apports de phosphore au champ et en serre

Les données relatives aux dosages de phosphore assimilable et total sont reprises dans le tableau 5.

B.2.1. Evolution du phosphore total en fonction des doses apportées

Les résultats sont présentés sur la figure 1. Les courbes montrent **une augmentation linéaire du phosphore total avec les doses apportées au champ et en serre**. La linéarité des courbes traduit la bonne conduite des diverses interventions expérimentales sur les échantillons de sol.

Le graphique qui concerne l'incubation de 72 jours montre que la quantité de phosphore contenu dans l'échantillon ayant reçu 10 tonnes de P_2O_5 au champ et 2 tonnes en serre est plus faible que la quantité attendue. Cette observation ne semble imputable ni à la variabilité des mesures, ni au dosage du phosphore puisque les deux méthodes de dosage ont donné des résultats sensiblement identiques (tableau 3). Il semble donc qu'il y ait eu **un erreur lors de l'application de phosphore** pour ce pot lors de la préparation de l'expérience en serre. L'absence de répétitions lors de l'expérience en serre ne nous permet pas de statuer sur cette hypothèse. Par ailleurs, les résultats sont beaucoup moins tranchés pour la durée d'incubation de 72 jours. Ceci pourrait être dû à une augmentation de la variabilité avec la durée d'incubation. Nous ne nous baserons donc pas sur les données d'incubation à 72 jours dans la suite de l'examen des résultats.

B.2.2. Variation du phosphore total au cours du temps

La figure 2 montre que **l'effet de la durée d'incubation sur les quantités de phosphore total semble limité**. Les tendances des courbes ne sont pas franches, tantôt croissantes tantôt décroissantes et les variations semblent aléatoires. Sur les graphiques, les intervalles associés à chaque point correspondent à la variabilité sur les mesures au laboratoire, estimée par la variabilité calculée sur les 12 répétitions (tableau 2). Faute de répétitions, il nous est impossible de construire des intervalles de confiance prenant en compte la variabilité due à l'expérimentation.

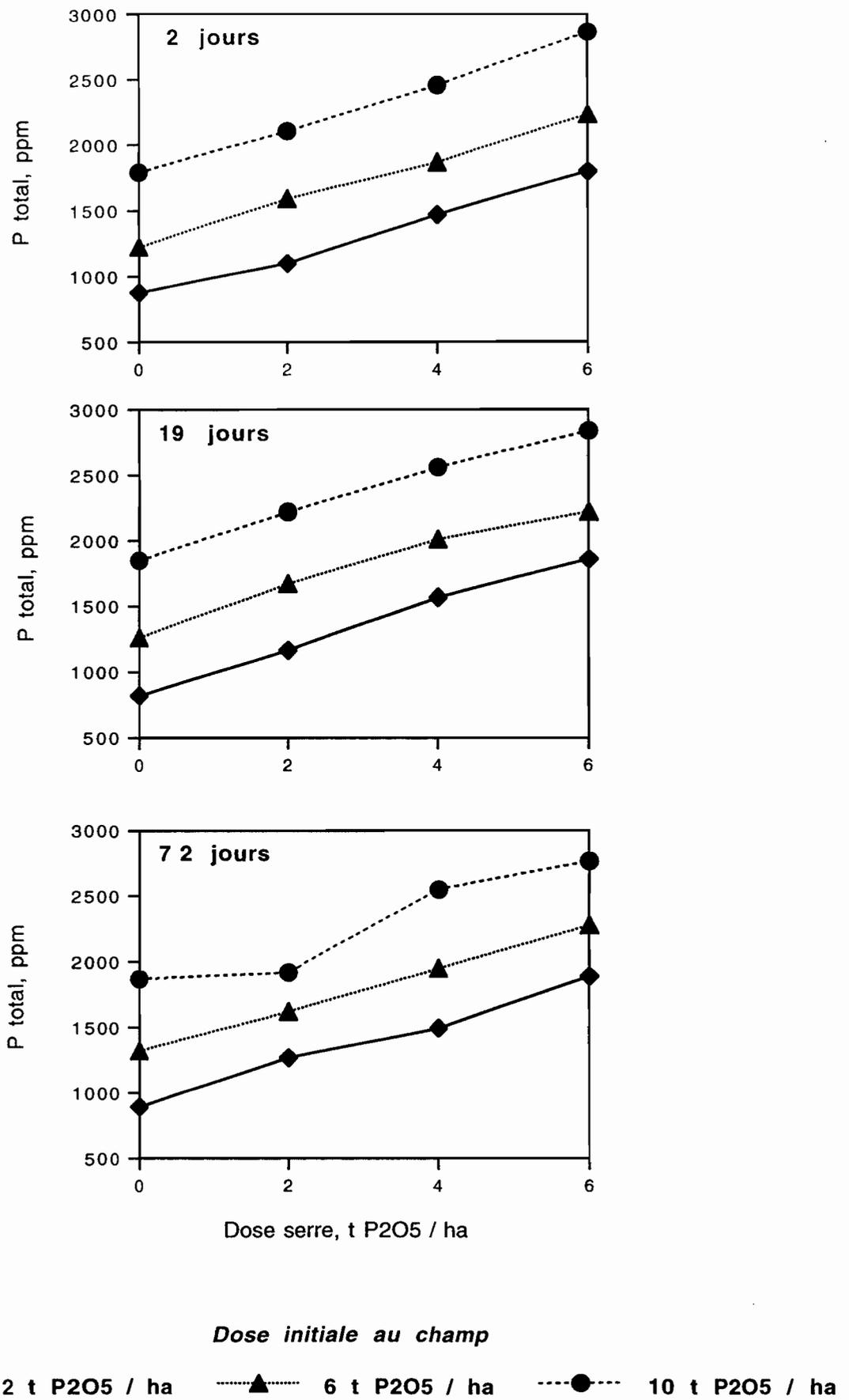
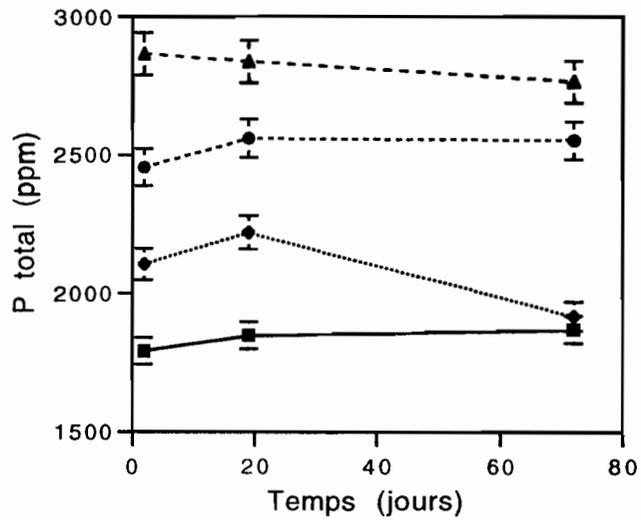
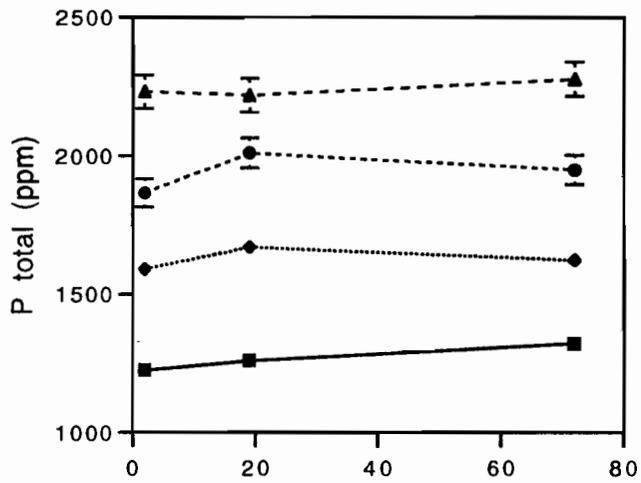
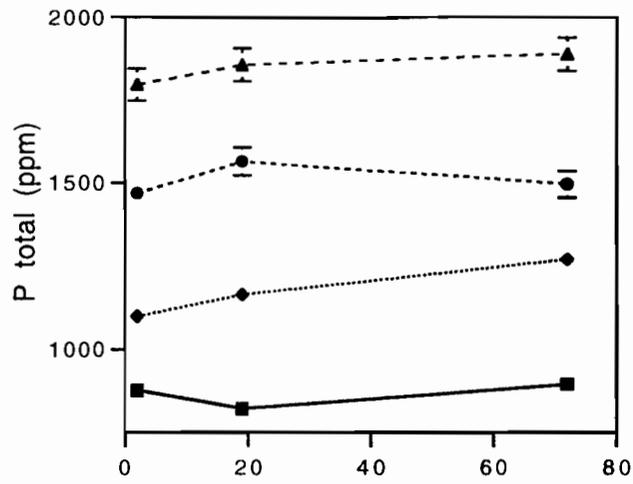


Figure 1. Evolution de la quantité de phosphore total en fonction des doses d'amendements phosphatés apportées au champ et en serre.



Dose complémentaire en serre

—■— 0 t P₂O₅ / ha ····◆···· 2 t P₂O₅ / ha - - - ● - - - 4 t P₂O₅ / ha - - - ▲ - - - 6 t P₂O₅ / ha

Figure 2. Evolution des teneurs en phosphore total en fonction du temps

Dose champ t P ₂ O ₅ /ha	Dose serre t P ₂ O ₅ /ha	2 jours d'incubation					19 jours d'incubation			72 jours d'incubation		
		P total N. ppm	P tot. M. ppm	P Olsen-D ppm	%assimil Nouméa	%assimil Montp.	P total N. ppm	P Olsen-D ppm	%assimil Nouméa	P total N. ppm	P Olsen-D ppm	%assimil Nouméa
2	0	876	868	26	3,0	3,0	820	31	3,8	894	44	4,9
	2	1099	1185	74	6,7	6,2	1164	70	6,0	1269	96	7,6
	4	1469	1580	135	9,2	8,4	1565	131	8,4	1495	122	8,2
	6	1796	1896	201	11,2	10,6	1857	174	9,4	1888	214	11,3
6	0	1225	1321	74	6,0	5,6	1260	78	6,2	1321	78	5,9
	2	1591	1631	131	8,2	8,0	1670	135	8,1	1622	126	7,8
	4	1866	1989	214	11,5	10,8	2010	218	10,8	1949	214	11,0
	6	2232	2191	283	12,7	12,9	2219	275	12,4	2276	301	13,2
10	0	1792	1875	148	8,3	7,9	1849	161	8,7	1870	170	9,1
	2	2106	2183	288	13,7	13,2	2219	209	9,4	1918	231	12,0
	4	2455	2498	323	13,2	12,9	2559	331	12,9	2551	353	13,8
	6	2865	2817	445	15,5	15,8	2838	462	16,3	2764	432	15,6

**Tableau 5. Phosphore total (méthode triacide) et phosphore assimilable (méthode Olsen-Dabin)
dans les sols de l'expérience en serre**

Les valeurs de phosphore total déterminées par Nouméa (N.) et par Montpellier (M.) sont présentées dans le cas d'une incubation de 2 jours
Le %assimil désigne la fraction de phosphore assimilable (=P Olsen-D / P total*100)

B.2.3. Relation entre phosphore assimilable et phosphore total

La figure 3 présente la relation liant le phosphore total au phosphore assimilable pour l'ensemble des échantillons, quelle que soit la durée d'incubation. Cette relation est de type linéaire et une régression donne :

$$P_{\text{assimilable}} = -177,88 + 0,20.P_{\text{total}}, \quad r^2=0,945$$

Les coefficients de cette équation suggèrent qu'il n'y aura pas ou très peu de phosphore assimilable dans le sol de Ouénarou tant que le niveau de phosphore total sera inférieur à 870 ppm de P. Dans ce même sol, ce niveau de phosphore assimilable sera atteint par un apport de 2,2 tonnes de P_2O_5 par hectare (cf. § B.1.). Par ailleurs, Bonzon et al. (1995) ont montré qu'un apport de 7 tonnes par hectare est nécessaire pour lever complètement au départ les carences en phosphore dans ce sol. L'utilité d'utiliser l'extraction Olsen Dabin pour estimer le phosphore assimilable par les végétaux cultivés a fait l'objet de nombreux travaux. Son avantage réside dans sa simplicité bien qu'elle sous-estime les prélèvements par les plantes (Pichot et al., 1973).

B.2.4. Phosphore assimilable et fractionnement des apports

L'indice le plus intéressant pour décrire l'assimilabilité du phosphore n'est pas le phosphore assimilable, mais le pourcentage de phosphore assimilable qui se définit comme la proportion de phosphore assimilable par rapport au phosphore total (tableau 5).

L'examen du tableau 5 montre que **le pourcentage de phosphore assimilable augmente linéairement avec les apports de phosphore au champ et en serre**. Cette évolution pourrait s'expliquer par une compétition du phosphore pour les sites de fixation ou une saturation des sites de surface facilement accessibles. Il serait intéressant de mener une étude de répétabilité pour le phosphore assimilable, identique à celle menée sur le phosphore total.

Le pourcentage de phosphore assimilable ne semble pas évoluer d'une manière franche en fonction du temps d'incubation. De nouveau, il aurait fallu conduire l'expérience sur une durée plus longue.

Le tableau 6 regroupe les couples d'échantillons qui ont reçu la même quantité de phosphore mais par des fractionnements différents. Les données ne sont présentées que pour un temps d'incubation de 2 jours puisque la durée d'incubation ne semble pas influencer sur l'assimilabilité dans l'intervalle de temps considéré.

D'après ces résultats, il est clair qu'un **fractionnement des apports augmente le pourcentage de phosphore assimilable dans le sol de Ouénarou**. Dans le cas où tout le phosphore est apporté au champ, les valeurs d'assimilabilité sont nettement inférieures aux cas pour lesquels une partie du phosphore est apporté au champ et l'autre partie en serre.

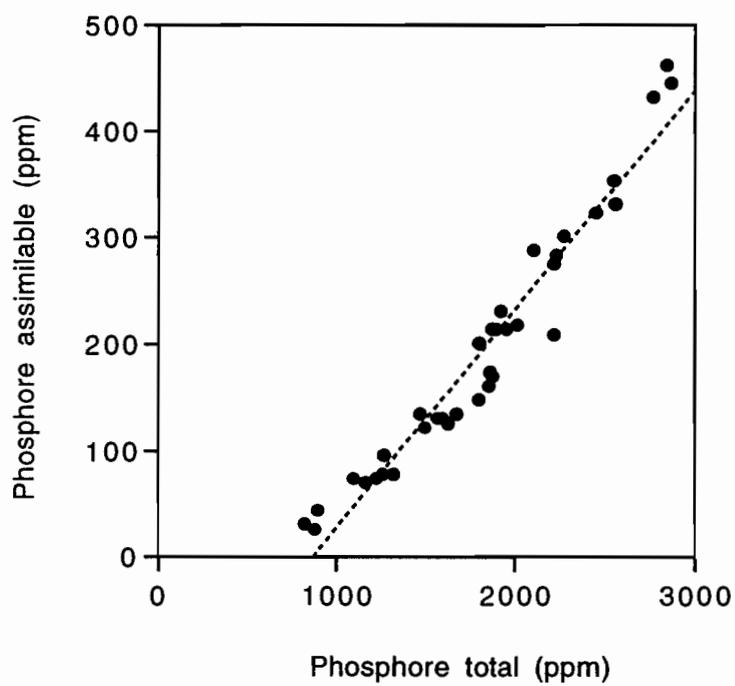


Figure 3. Relation entre le phosphore total et le phosphore assimilable

Dose champ t P ₂ O ₅ /ha	Dose serre t P ₂ O ₅ /ha	Dose totale t P ₂ O ₅ /ha	% assimilable
2	4	6	8,4
6	0		5,6
2	6	8	10,6
6	2		8,0
6	4	10	10,8
10	0		7,9
6	6	12	12,9
10	2		13,2

Tableau 6. Comparaison de l'assimilabilité du phosphore des couples d'échantillons ayant reçu des quantités de phosphore totales identiques mais par des fractionnements différents.

Il est possible de calculer la part des apports au champ et en serre dans le pourcentage de phosphore assimilable à la fin de l'expérience en serre, en résolvant le système de six équations à deux inconnues (le dernier couple d'équations n'a pas été retenu, compte tenu des remarques du paragraphe B.2.1.) :

$$\left. \begin{array}{l} 8,4 = (2/6).C + (4/6).S \\ 5,6 = (6/6).C \\ 10,6 = (2/8).C + (6/8).S \\ 8,0 = (6/8).C + (2/8).S \\ 7,9 = (10/10).C \\ 10,8 = (6/10).C + (4/10).S \end{array} \right\}$$

où C est un coefficient proportionnel à la contribution du phosphore apporté au champ, et S est un coefficient proportionnel à la contribution du phosphore apporté en serre

Par régression linéaire sur le système précédent, on obtient :

- $C=7,26 \pm 1,63$
- $S=11,04 \pm 1,09$

Le phosphore apporté lors de l'expérience en serre contribue donc une fois et demi plus au phosphore assimilable que le phosphore apporté 20 mois auparavant au champ, dans les conditions de notre expérimentation.

C. Influence d'un apport de phosphore au champ ou en serre sur la capacité de fixation du phosphore

Les évolutions de la capacité d'adsorption du phosphore ont été déterminées au laboratoire par construction des isothermes d'adsorption du phosphore sur chaque échantillon (figure 4). L'exploitation de ces graphiques n'étant pas aisée, les résultats sont résumés par les deux paramètres de l'équation de Freundlich K_f et n_f (tableau 7). K_f est généralement considéré comme un estimateur de la capacité d'adsorption du phosphore.

C.1. Evolution de la capacité d'adsorption en fonction du temps

Les coefficients de corrélation élevés obtenus en ajustant les données à l'équation de Freundlich suggèrent que cette équation est adaptée à la description de nos données et que les expériences ont été soignées (tableau 7).

Les valeurs de K_f sont élevées et celles de n_f faibles comparées aux données bibliographiques. Ceci traduit la forte capacité de ces sols à fixer quantitativement et qualitativement le phosphore.

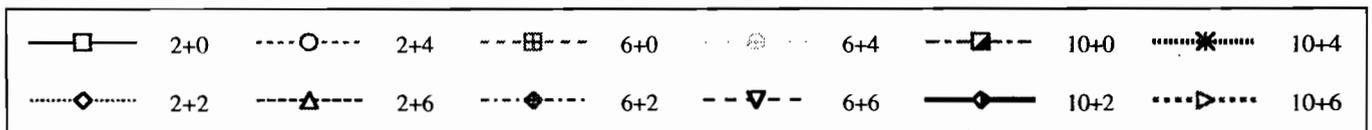
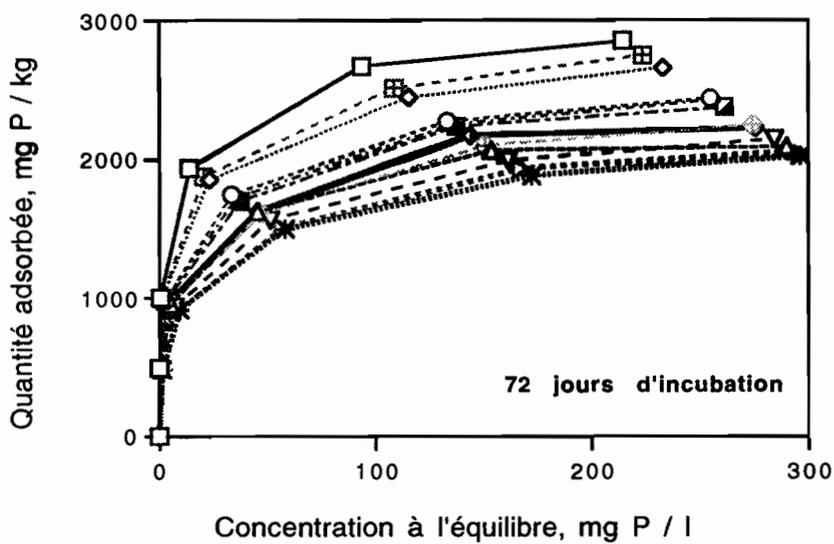
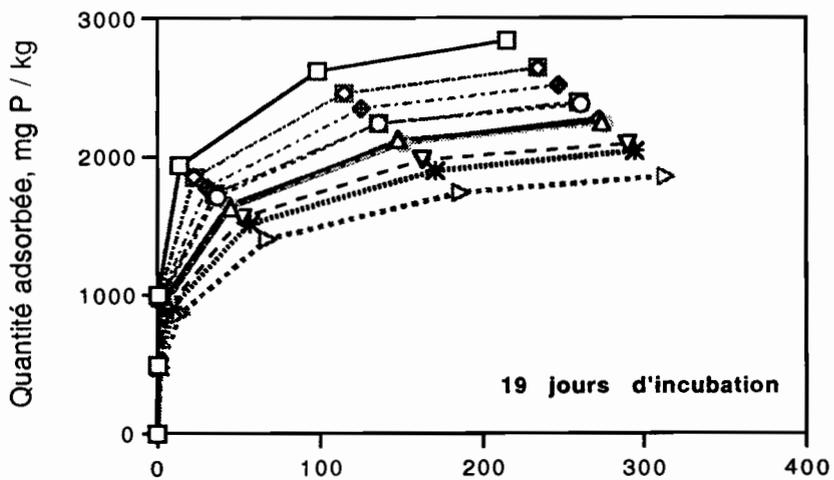
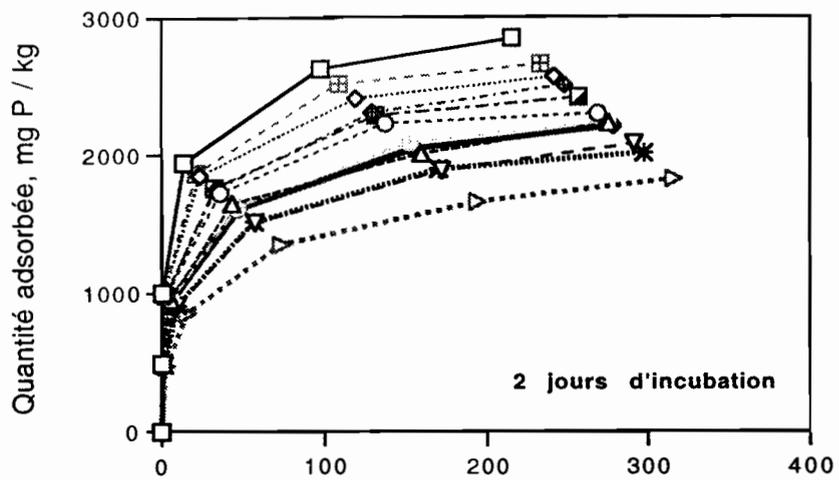


Figure 4. Isothermes d'adsorption du phosphore sur les 12 traitements après 3 durées d'incubation

Légende: dose au champ + dose en serre

Dose champ t P ₂ O ₅ /ha	Dose serre t P ₂ O ₅ /ha	2 jours d'incubation			19 jours d'incubation			72 jours d'incubation		
		K _f	n _f	r ²	K _f	n _f	r ²	K _f	n _f	r ²
2	0	1021,48	0,199	0,976	1061,85	0,191	0,981	1222,77	0,164	0,995
	2	905,20	0,198	0,984	954,50	0,193	0,992	924,59	0,200	0,991
	4	768,83	0,206	0,985	772,27	0,209	0,993	795,07	0,209	0,993
	6	643,16	0,226	0,990	667,10	0,224	0,993	678,55	0,210	0,983
6	0	928,98	0,203	0,982	935,31	0,198	0,990	961,64	0,200	0,991
	2	787,13	0,216	0,992	843,82	0,205	0,994	780,60	0,211	0,993
	4	633,24	0,232	0,993	666,83	0,222	0,993	643,95	0,229	0,993
	6	528,04	0,246	0,996	576,12	0,236	0,990	591,59	0,234	0,994
10	0	781,43	0,212	0,987	775,14	0,210	0,990	840,25	0,192	0,996
	2	622,94	0,231	0,992	669,37	0,224	0,993	714,80	0,211	0,991
	4	533,27	0,241	0,991	540,74	0,240	0,994	535,29	0,240	0,994
	6	415,25	0,262	0,996	450,47	0,253	0,992	526,54	0,247	0,992

Tableau 7. Evolution des paramètres de l'équation de Freundlich en fonction des doses de phosphore apportées

$$x/m = K_f \cdot C^{n_f}$$

Une légère tendance à l'augmentation de K_f et à la diminution de n_f avec les durées d'incubation peut être remarquée, ce qui va dans le sens d'une baisse de la disponibilité du phosphore pour les plantes avec le temps. Cette observation a également été faite lors d'expériences d'adsorption sur des échantillons de sol non fertilisé (résultats non publiés). Ces résultats sont en accord avec les conclusions du paragraphe précédent, à savoir que le temps de séjour du phosphore dans ce sol diminuerait sa disponibilité.

C.2. Evolution de la capacité d'adsorption en fonction des apports de phosphore

Les évolutions de la capacité de fixation du phosphore, représentée par le paramètre K_f de Freundlich sont présentées sur la figure 5. Les trois graphiques montrent une décroissance linéaire de la capacité d'adsorption du phosphore avec les apports de phosphore en serre, mais aussi avec les apports effectués au champ. Un apport de 6 t P_2O_5 / ha en serre permettrait de diminuer la capacité d'adsorption d'environ 40% (tableau 7).

Les trois courbes représentant des apports au champ différents sont parallèles (figure 5), ce qui signifie que la capacité maximale d'adsorption du phosphore de ces sols n'est pas atteinte. Le large écart entre les courbes souligne l'effet marqué d'additions précédentes sur la capacité d'adsorption du phosphore. Cet effet serait sûrement moins important si le phosphore avait été apporté plus tôt au champ (phénomène de rétrogradation). La prise en compte de l'historique de fertilisation de la parcelle est donc nécessaire dans le raisonnement des apports phosphatés.

L'augmentation des doses de phosphore au champ comme en serre entraîne une augmentation du paramètre n_f de l'équation de Freundlich (tableau 7), sans qu'il soit possible de fournir d'explication à cette hausse.

De la même façon que précédemment, il est possible de comparer la capacité d'adsorption du phosphore pour des couples (apports serre+apports champ) identiques. Un fractionnement des apports dans le temps entraîne une baisse de la capacité d'adsorption du phosphore (tableau 8). L'augmentation de l'assimilabilité du phosphore (tableau 6) peut donc être mise en relation avec la baisse de sa capacité d'adsorption. En terme de mécanismes, un apport de phosphore entraîne une occupation transitoire des sites de fixation de surface facilement accessibles. Les molécules de phosphore diffusent alors à l'intérieur des structures pour aller se fixer sur les sites de plus forte énergie, libérant ainsi des sites d'accès en surface. Si une application de phosphore intervient alors que les sites de surface ne sont pas encore relibérés (par recours à des apports de phosphore relativement rapprochés dans le temps par exemple), on aura une relative augmentation de la teneur en phosphore dans la solution du sol, et donc une meilleure assimilation par les plantes. Il serait intéressant de préciser les vitesses de rétrogradation du phosphore pour déterminer l'intervalle entre deux amendements phosphatés.

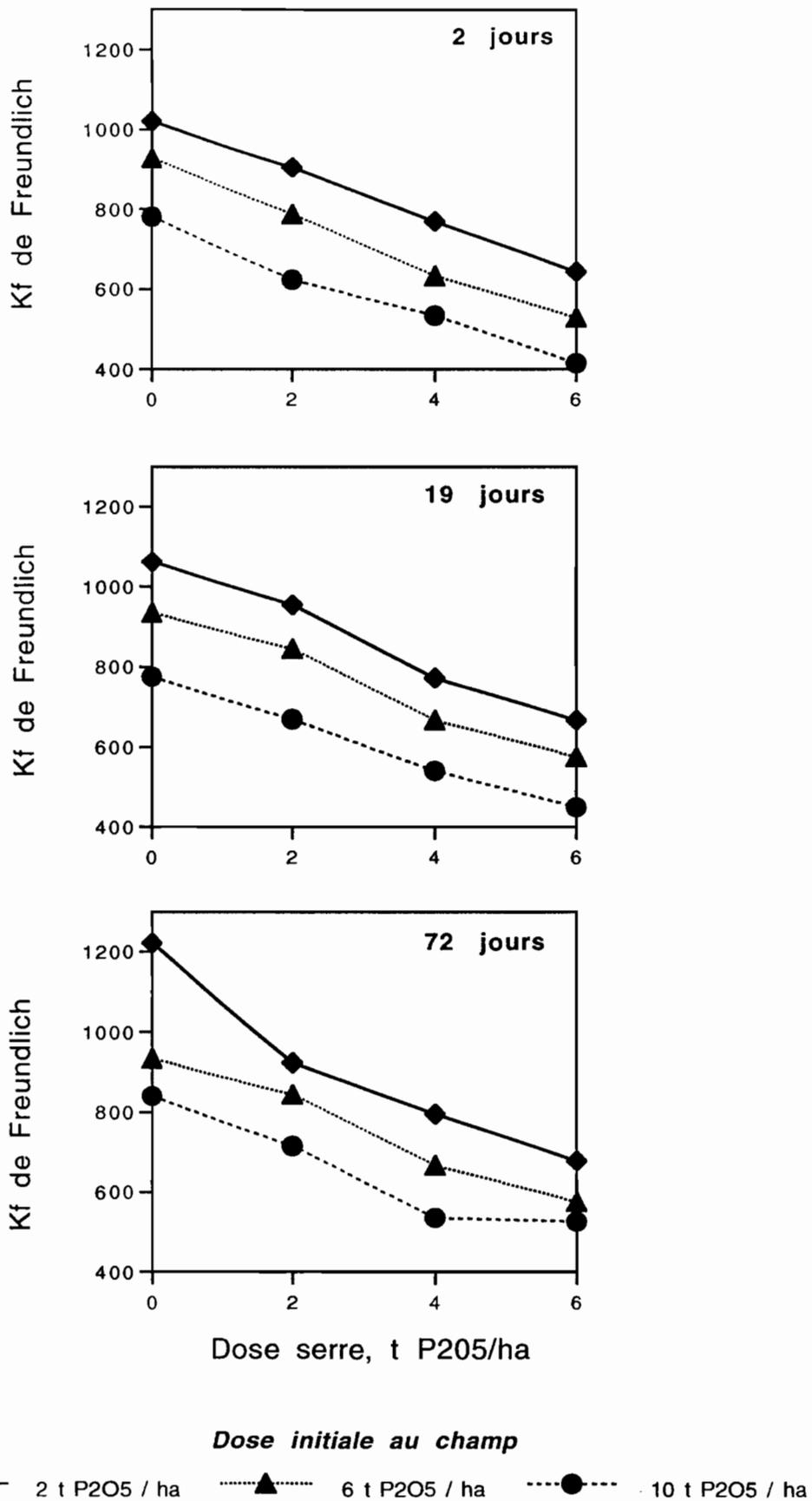


Figure 5. Evolution de la capacité d'adsorption du phosphore en fonction des apports de phosphore complémentaires en serre

Dose champ t P ₂ O ₅ /ha	Dose serre t P ₂ O ₅ /ha	Dose totale t P ₂ O ₅ /ha	Kf de Freundlich
2	4	6	769
6	0		929
2	6	8	643
6	2		787
6	4	10	633
10	0		781
6	6	12	528
10	2		623

Tableau 8. Comparaison de la capacité d'adsorption des couples d'échantillons ayant reçu des quantités de phosphore totales identiques mais par des fractionnements différents.

III. Conclusions et perspectives

L'addition des variabilités des expériences menées au champ, en serre, et au laboratoire pouvait laisser supposer que les résultats obtenus seraient peu exploitables. Ce n'est cependant pas le cas et la conduite de trois expérimentations couplées (champ + serre + laboratoire) fournit des résultats intéressants. Les expériences ont donc été bien menées dans l'ensemble. Les principales conclusions de cette étude sont reprises ci-dessous.

D'un point de vue des **méthodes de dosage du phosphore** dans les sols, les études menées montrent que :

- au sein des laboratoires d'analyses, les dosages doivent être effectués, dans la mesure du possible, par la même personne, sous peine d'introduire un biais dans les résultats
- les méthodes de dosage totale et pseudo-totale semblent donner des résultats comparables dans les sols du Sud
- l'influence du laboratoire qui effectue les dosages est limité dans le cas du dosage du phosphore total.

D'un point de vue de la **réalisation des expériences**, il ressort que :

- l'étude des résultats présentés dans ce rapport a révélé une erreur d'application du phosphore au champ et une erreur sur l'apport de phosphore pour un pot lors de l'expérience en serre.

En ce qui concerne les **modification induites par un apport de phosphore**,

- une augmentation des doses de phosphore au champ comme en serre entraîne une diminution de la capacité d'adsorption du phosphore
- elle induit également une augmentation de l'assimilabilité du phosphore, résultant de la baisse d'adsorption
- il n'a pas pu être observé clairement de diminution de l'assimilabilité du phosphore avec le temps d'incubation (rétrogradation) dans les conditions des expériences.

D'un point de vue des **applications pratiques**, les expériences ont révélé que :

- un fractionnement des apports entraîne une augmentation de l'assimilabilité du phosphore.
- dans les conditions de l'expérience, le phosphore appliqué en serre, contribue 1,5 fois plus au phosphore assimilable que le phosphore appliqué au champ 17 mois auparavant.

Les résultats présentés ici soulèvent de nouvelles interrogations, auxquelles il serait possible de répondre par des expériences complémentaires :

• **Quel intervalle peut-on raisonnablement laisser entre deux fertilisations dans le cadre d'un fractionnement des apports ?**

Un élément de réponse à cette question peut être obtenu en établissant une expérience en vases de végétation sous conditions contrôlées (température, humidité, ensoleillement) avec une plante test. Il s'agit de prévoir dans le temps des fertilisations phosphatées telles qu'au moment du début de l'expérience, les temps de contact sol-phosphore soient différents. Un suivi de la production végétale, de l'assimilabilité et de la capacité d'adsorption du phosphore permet alors de suivre la rétrogradation du phosphore et de déterminer un intervalle de temps maximum à laisser entre deux fertilisations.

• **A quelle profondeur descendra le phosphore dans un profil dans le cadre d'une irrigation fertilisante, compte tenu de la très forte adsorption sur les particules de sol ?**

Il convient de mettre en place une expérience sur colonne avec un cylindre en PVC constitué de 2 demi-cylindres maintenus ensemble par du scotch. Après remplissage de la colonne (sol remanié ou en place) et percolation à différentes vitesses d'une solution de phosphore, la colonne est congelée rapidement. Il suffit alors de découper des tranches (0,5 ou 1 cm d'épaisseur) dans la colonne, de les décongeler et de faire doser le phosphore.

• **Pourquoi n'a-t-on pas mis clairement en évidence le phénomène de rétrogradation dans les expériences menées ?**

Deux explications sont possibles : soit la variabilité de l'expérience menée était trop grande pour montrer des différences, qui peuvent être très faibles ; soit l'expérience n'a pas été menée sur un intervalle de temps assez long. Dans les deux cas, il faudrait appliquer le même type de protocole en allongeant le temps d'expérimentation. Ceci présenterait néanmoins le désavantage d'augmenter la variabilité des résultats (voir § B.2.1.) et de nécessiter donc la mise en place de répétitions.

Références citées

BONZON B., L'HUILLIER L., EDIGHOFFER S., BOURDON E., BECQUER T., LAUBREAUX P., 1995. Facteurs de fertilité et conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre. Historique et résultats des recherches. Questions pour l'avenir. Nouméa:ORSTOM, Conv.:Sci. Vie ; Agropédologie, 31, 30p.

C.P.C.S., 1967. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Classification des sols. ENSA-GRIGNON, 87 p. multigr.

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

F.A.O.-U.N.E.S.C.O., 1974. Soil Map of the World, vol. 1, Legend UNESCO, Paris, 59 p.

LATHAM M., QUANTIN P., AUBERT G., 1978. Etude des sols de Nouvelle Calédonie, Notice explicative de la carte pédologique de Nouvelle Calédonie à 1 / 1000000. ORSTOM, Paris.

MURPHY J., RILEY J.P., 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. Anal. Chem. Acta., 27:31-36.

PICHOT J., TRUONG B., BURDIN S., 1973. Evolution du phosphore dans un sol ferrallitique soumis à différents traitements agronomiques. Agron. Trop., XXVIII, 2:131-146.

R.P.F., 1990. Référentiel Pédologique Français. 3ème proposition, avril 1990. AFES-INRA. 279 p.

USDA, 1960. Soil classification, a comprehensive system. 7th approximation. US gov. printer. 265 p.

