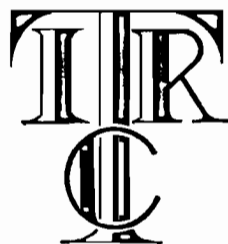


MÉTHODE D'ÉTUDE DE LA FIXATION DU PHOSPHORE SUR LES SOLS TROPICAUX

par

B. DABIN

avec la collaboration technique
de Mme N'GUYEN TAN LOY



MÉTHODE D'ÉTUDE DE LA FIXATION DU PHOSPHORE SUR LES SOLS TROPICAUX

par

B. DABIN

avec la collaboration technique
de Mme N'GUYEN TAN LOY

PLAN DE MEMOIRE

INTRODUCTION.

PREMIÈRE PARTIE :

Etude bibliographique sommaire.

DEUXIÈME PARTIE :

Méthode d'étude des formes du phosphore dans les sols tropicaux et leur solubilité :

- a) Application de la méthode « CHANG et JACKSON » aux sols tropicaux.
- b) Mise au point d'une méthode d'appréciation du

phosphore extractible.

TROISIÈME PARTIE :

Etude expérimentale de la fixation et de l'évolution du phosphore soluble appliqué au sol (essais en laboratoire).

QUATRIÈME PARTIE :

Application de la technique d'étude de fixation à divers types de sol tropicaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

INTRODUCTION

L'étude du phosphore dans la plante et le sol, ainsi que les essais de divers engrais phosphatés, ont donné lieu depuis près d'un siècle et demi à un très grand nombre de travaux et publications. BOISCHOT en a rédigé récemment un bref historique et extrait quelques idées maîtresses ; on pourrait donc penser que le sujet est un peu épuisé, or il n'en est rien ; les travaux les plus récents viennent préciser les notions anciennes et facilitent la compréhension de phénomènes qui se produisent dans tel ou tel cas particulier.

En ce qui nous concerne, c'est essentiellement le problème du phosphore dans les sols tropicaux qui retient notre attention parce que cet élément est d'une importance capitale dans la fertilité de ces sols et qu'il donne lieu encore à l'heure actuelle à bien des discussions.

La caractéristique principale des sols tropicaux est qu'ils sont en général très pauvres en phosphore et présentent vis-à-vis de cet élément un intense pouvoir de « fixation ». Il faut bien entendu distinguer les termes de « rétention » et de « fixation » :

— la rétention étant le passage du phosphore de la phase liquide à la phase solide ;

(*) Travail effectué au Laboratoire de Pédologie Appliquée, Services Scientifiques Centraux (Bondy). Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.).

(**) L'introduction, les première, deuxième et troisième parties sont publiées dans ce fascicule ; la quatrième partie et la conclusion générale paraîtront dans le fascicule 3.

— et la fixation étant la perte d'assimilabilité pour les plantes.

On sait depuis fort longtemps que la fixation du phosphore est due à la formation de composés insolubles avec divers cations métalliques existant dans le sol.

BRIOUX en 1923 disait que « si le P_2O_5 est fixé par le carbonate de chaux dans les terres calcaires, il paraît se combiner de préférence au fer et à l'aluminium dans les terres acides ». Plus récemment, DEMOLON et ses collaborateurs (1951) précisaient que la fixation irréversible de l'acide phosphorique dans le sol est due essentiellement à sa combinaison avec le fer libre contenu dans celui-ci. Elle est d'autant plus importante que la quantité de fer libre est plus élevée. A partir d'un certain taux, le carbonate de calcium et la matière humique inhibent le pouvoir fixateur du fer vis-à-vis de l'acide phosphorique. Par ailleurs, ils indiquaient que la liaison avec le fer donnait un équilibre très long à s'établir après des mois et même des années.

Par extrapolation de ces données, on a pu conclure que dans les sols tropicaux riches en fer libre et acides, la fixation du phosphore était intense, mais les travaux consacrés spécialement à ces sols sont moins nombreux que ceux portant sur les sols des régions tempérées.

L'objectif essentiel de l'étude présente est de préciser, par l'étude de travaux récents et par quelques expériences personnelles, le problème de la « fixation » du phosphore dans les sols tropicaux, en utilisant uniquement des techniques chimiques relativement simples et applicables en routine.

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SOMMAIRE

1) LES FORMES DU PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX ET LEUR ASSIMILABILITÉ

C'est surtout dans la littérature de langue anglaise que l'on trouve de nombreux articles consacrés au problème des combinaisons du phosphore avec le fer et l'aluminium.

SAUNDER, en 1956, montre que, dans les sols de la Rhodésie du Sud, une extraction à la soude 0,1 N pendant une heure au bain-marie, donne des résultats pour le phosphore minéral, qui sont en bonne corrélation avec les rendements des principales cultures; cependant, les chiffres sont plus élevés dans le cas des sols argileux que dans les sols sableux. La soude extrait les formes principales de phosphore de ces sols qui sont liées au fer et à l'aluminium, mais sans distinguer entre les deux. LLOYD JENKINS (1956) reprend le même réactif et compare les résultats avec le phosphore labile (L) obtenu dans des essais en pots sur des sols de la Rhodésie et de l'Uganda. Les chiffres obtenus par les deux méthodes sont en corrélation et du même ordre de grandeur. Il semble que dans les sols de l'Uganda, le P labile des essais en pots est du même ordre de grandeur que P Al, alors que P Fe est beaucoup plus important.

C'est grâce à la méthode de CHANG et JACKSON (1957) que l'on peut extraire et séparer la totalité des différentes formes de phosphore liées aux différents cations métalliques, alors que la méthode de SAUNDER ne fait qu'une extraction globale et partielle du phosphore lié à Al et à Fe.

La méthode de CHANG et JACKSON permet d'extraire :

— le phosphore soluble par le chlorure d'ammonium normal (ce peut être fréquemment du phosphate mono ou bicalcique);

— le phosphore lié à l'aluminium par le FNH, 0,5 N;

— le phosphore lié au fer par Na (OH) 0,1 N (l'extraction dure plus de huit heures et est ainsi totale);

— le phosphore lié au calcium par SO_4H_2 0,5 N (il s'agit de phosphates calciques peu solubles).

D'autres formes plus fortement rétrogradées peuvent être dosées également: phosphate de fer et d'alumine dits « d'inclusion », phosphore organique, etc.

Dans le présent travail, nous étudions principalement les formes minérales non rétrogradées correspondant aux quatre premières extractions.

CHANG et JUO (1963) ont cherché à relier les résultats obtenus par les techniques courantes d'analyse du phosphore assimilable, et les différentes formes existant dans les sols.

Ils ont étudié :

— des réactifs acides comme le Truog (SO_4H_2 0,002 N) ou Nord Caroline (0,05 N HCl + 0,025 N H_2SO_4);

— des réactifs basiques comme Olsen (CO_3NaH 0,5 N);

— ou des réactifs mixtes comme les réactifs de Bray (0,03 N NH_4F + 0,025 N HCl).

Les réactifs acides représentent mieux le phosphore assimilable lorsque le phosphate de chaux domine.

Les réactifs alcalins sont meilleurs lorsque P Fe et P Al dominant.

Les réactifs mixtes contenant NH_4F et un acide sont préférables lorsque les trois formes sont équivalentes.

Par exemple, dans des cultures de riz en pots sur sols, où les phosphates de fer dominant, la réponse aux engrais phosphatés est en bonne corrélation avec le phosphore dosé dans un extrait alcalin; la corrélation est moins bonne avec le mélange acide fluorure, et faible avec le réactif acide.

Par ailleurs, SRIVASTAVA et PATHAK, sur des sols à coton des Indes, ont obtenu des conclusions à peu près analogues en ce qui concerne les relations entre les principales méthodes d'analyse du phosphore assimilable (BRAY, TRUOG, OLSEN, etc) et les formes extraites par la technique de CHANG et JACKSON, mais en outre, ils ont montré que pour des pH variant de 6 à 8, et des teneurs en argile variables, il existait une corrélation hautement significative entre le phosphore extrait à l'eau, et le phosphore extrait par NH_4Cl (P = 0,01), et une corrélation significative (P = 0,05) avec le phosphore extrait par NH_4F (P Al). Par contre, il n'y avait pas de corrélation entre l'extrait à l'eau, d'une part, PFe et PCa, d'autre part.

Des expériences récentes effectuées par ALBAN, VACHAROTOYAN, JACKSON, sur des sols rouge-brun latéritiques de l'Oregon, ont porté sur les formes du phosphore obtenues après enrichissement par des phosphates solubles dans des pots de culture. L'effet du chaulage a été étudié, de même que les rendements des plantes, leurs exportations en phosphore et la perte d'éléments dans le sol pendant la culture.

Par apport de P_2O_5 soluble, ces sols à fort pouvoir de fixation présentent une augmentation :

de PAl (extrait NH_4F);

de PFe (extrait NaOH);

et une légère diminution de PCa (extrait SO_4H_2).

La forme extraite par NaOH domine la forme extraite par NH_4F .

L'addition de chaux augmente l'extrait NH_4F (P Al) de même l'extrait SO_4H_2 (P Ca) et diminue l'extrait NaOH (P Fe).

Après la culture, les sols sont analysés à nouveau, et la perte en phosphore des différentes formes est mise en relation avec l'exportation du phosphore par les plantes.

Seule la quantité de P Al (extrait par FNH_4) perdue pendant la culture présente une corrélation étroite avec la quantité de phosphore exportée en pot par l'avoine et le trèfle.

Par contre, on n'observe aucune corrélation entre l'exportation des plantes et la diminution des teneurs en P Fe et P Ca (extraits NaOH et SO_4H_2).

Les auteurs en concluent que la fraction du phosphore soluble dans NH_4F est une source importante de phosphore exportée par les plantes dans les sols rouge-brun latéritiques.

Les auteurs ont également analysé les sols avec les principaux réactifs au phosphore assimilable, seuls les réactifs contenant NH_4F comme la méthode de BRAY ou la méthode OLSEN modifiée n° 3 (NH_4F 0,5 N + CO_2NaH 0,5 N pH 8,5) permettent de récupérer une importante fraction du phosphore soluble ajouté au sol, 60 % dans le cas de OLSEN modifiée, alors que les méthodes comme OLSEN simple ou TRUOG ne permettent de récupérer que 10 % du P_2O_5 soluble ajouté.

Ces résultats présentent un grand intérêt en ce qui concerne l'analyse des sols topicaux ; il semble préférable d'adopter une technique d'analyse en milieu alcalin comme la méthode OLSEN modifiée, plutôt qu'en milieu acide comme la méthode de BRAY, en raison de la prédominance de P Al et P Fe et de la faible teneur en P Ca dans ces sols.

2) NATURE DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS PHOSPHATÉS DU SOL ET ASSIMILABILITÉ

Les techniques d'extraction chimique donnent une idée des formes de fixation du phosphore sur les sols, mais ne renseignent pas sur la nature exacte des composés du phosphore.

TAYLOR, GURNEY, LINDSAY (1960) ont étudié différents complexes plus ou moins cristallisés formés par le phosphore au contact du sol.

Ce sont :

— Le phosphate de fer et de calcium $\text{H}_2\text{CA Fe}_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$;

— Le taranakite de potassium $\text{H}_2\text{K}_3 \text{Al}_2 (\text{PO}_4)_6 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$;

— Le phosphate de fer et de potassium $\text{H}_2\text{K Fe}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$;

— Les phosphates colloïdaux de fer et d'aluminium ;

— Les leucophosphates de fer et d'aluminium $\text{KAl}_2(\text{ou Fe}_2)(\text{PO}_4)_2 \text{OH}, 2 \text{H}_2\text{O}$;

— La strengite et la variscite $\text{PO}_4 \text{Fe PO}_4 \text{Al}$.

Les auteurs ont étudié l'exportation du phosphore des différents composés par trois cultures successives de maïs en pot (sol sablo-limoneux du Tennessee, déficient en phosphore). Ils ont comparé une dose de 1 000 mg par pot et une dose de 200 mg à pH 4,8 et à pH 6,3 (obtenu par chaulage).

Le phosphate de fer et de calcium est exporté en quantité presque équivalente à un phosphate monocalcique pur. L'exportation augmente avec la dose et également avec le chaulage.

Le taranakite de potassium (P Al K) est exporté en moindre quantité, mais encore relativement importante.

À pH 4,8, l'exportation est faible à 200 mg, mais augmente fortement à 1 000 mg.

À pH 6,3, l'exportation est augmentée pour la dose de 200 mg.

Le taranakite de potassium est très bien exporté à pH neutre, il est bien exporté à pH acide, mais à forte dose.

Le phosphate d'alumine colloïdal est très bien absorbé avec le chaulage, il est moyennement absorbé à pH acide, mais pour la forte dose.

Le phosphate de fer colloïdal est très mal absorbé à pH acide, même à forte dose, le chaulage augmente très fortement son absorption.

Le phosphate de fer et de potassium est très mal absorbé à tous les pH et à toutes les doses.

En ce qui concerne les autres formes de phosphates dans lesquels la teneur en phosphore diminue, ils ne sont pas assimilables en milieu acide. Seuls les phosphates d'alumine augmentent de solubilité en milieu basique.

L'étude de ces composés montre que le phosphate d'alumine présente dans les différentes conditions un degré d'assimilabilité supérieur au phosphate de fer.

Le taranakite de potassium et le phosphate d'alumine colloïdal présentent une certaine assimilabilité à pH acide à condition que la dose soit suffisante.

À pH neutre, tous les phosphates d'aluminium sont utilisés par les plantes.

Les phosphates de fer ne sont jamais utilisés par les plantes en milieu acide ; le chaulage accroît l'exportation uniquement dans le cas du phosphate de fer colloïdal.

Le phosphate de fer et de calcium est une forme transitoire qui se forme en premier lieu par réaction des oxydes de fer avec un phosphate acide de calcium (exemple superphosphates) ; ensuite, il s'hydrolyse en donnant un phosphate bicalcique et un phosphate de fer insoluble.

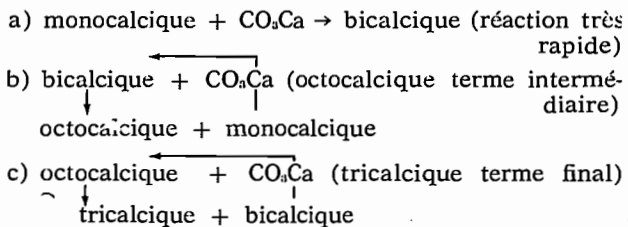
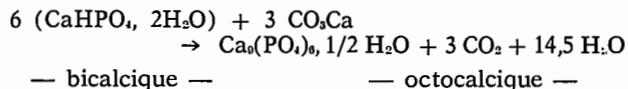
Les phosphates de calcium

Ces phosphates ont été davantage étudiés dans les sols calcaires des régions tempérées et méditerranéennes, nous en parlerons peu car il n'existe prati-

quement pas de sols calcaires en zone tropicale, mais il peut y avoir des sols riches en calcium comme les vertisols, ou certains sols formés sur roches basiques ou des sols ferrallitiques sur calcaire dans les régions peu humides.

D'après la thèse de ARVIEU (1967), résumée par BORSCHOR(1), le phosphate monocalcique lors de sa combinaison avec le calcaire donne un mélange de phosphates dicalciques, octocalciques, tricalciques et d'hydroxylapatite en proportions variables suivant le temps de contact.

Le phosphate dicalcique n'est pas stable et évolue avec le temps vers des formes plus riches en calcium et de solubilité moindre :



La réaction a est rapide, les réactions b et c sont lentes et retardées par l'abaissement de température.

D'après MORENO, LINDSAY et OSBORN (1961), la vitesse de précipitation du bicalcique en octocalcique à pH supérieur à 6,4 est réduite par la présence de matière organique.

3) ÉVOLUTION DANS LE TEMPS DU PHOSPHORE APPORTÉ AU SOL

CHANG et CHU (1961) ont montré expérimentalement que lorsqu'on ajoute du phosphate soluble à des sols dont le pH varie de 5,3 à 7,5, la fixation (on devrait dire l'adsorption) au bout de trois jours se fait essentiellement, soit sous forme de P Al (extrait par FNH_4), soit sous forme de P Ca (extrait acide), si le sol est à une humidité proche de l'humidité équivalente.

Après 100 jours P(Al) et P(Ca) diminuent et P(Fe) extrait à la soude augmente. Dans un sol très humide cette augmentation est plus rapide. Dans une suspension de sol, même après un temps court, c'est la forme P Fe qui domine, quel que soit le sol.

Il semble donc que *c'est cette forme P(Fe) qui est la moins soluble et vers laquelle évoluent plus ou moins rapidement les autres formes plus solubles.*

La rétention du phosphore en un temps court dépend donc du contact entre le phosphate et la phase solide, puis à la longue le phosphore évolue vers la forme la moins soluble, la rapidité de cette évolution dépend de l'humidité du sol.

Nous pouvons commenter cette expérience en supposant que si la fixation immédiate se fait prin-

cipalement sur les ions Al, c'est qu'ils représentent une surface de contact importante dans la phase solide ; or, même dans les sols ne contenant que peu ou pas d'aluminium libre, cette fixation est dominante en temps court ; c'est donc vraisemblablement les ions Al de l'argile qui interviennent dans ce cas, et il s'agit plus d'une sorte de chimio-sorption que de la formation de phosphates d'alumine bien définis.

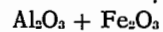
Il peut en être de même pour le calcaire fin de la fraction argileuse ou même pour le calcium échangeable de l'argile lorsqu'il est dominant.

Les oxydes libres dont le pouvoir de fixation est intense peuvent présenter des surfaces variables, et le contact est augmenté par l'humidité ou la suspension dans l'eau.

D'après ALAN WILD (1950), la goethite, la gibbsite et la bauxite absorbent très bien PO_4 , mais pas l'hématite.

Il existe des corrélations entre l'absorption de PO_4 et les quantités de fer et d'aluminium dans les sols.

Cette absorption varie en sens inverse du rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$.



Si on extrait Fe par l'hydrosulfite, on diminue l'absorption ; de même, on peut bloquer l'absorption de PO_4 sur Fe et Al par la 8 hydroxyquinoléine.

SHELTON et COLEMAN (1968) ont effectué des essais de longue durée pendant huit années sur les résidus laissés dans le sol par de fortes fumures phosphatées (300 à 1 300 kg/ha).

Les sols proviennent de Caroline (Georges Ville) et ont un pH de 5,3 au départ ; ils ont été portés à pH = 6, par chaulage.

Le phosphore assimilable a été contrôlé par la méthode Nord Caroline (0,05 N HCl + 0,025N H_2SO_4).

Par ailleurs, les formes du phosphore ont été dosées par la méthode CHANG et JACKSON.

Les résultats ont montré que la réaction du phosphore avec le sol est lente, elle est incomplète après 18 mois.

De fortes applications d'engrais peuvent maintenir un haut niveau de P_2O_5 assimilable pendant un temps suffisamment long.

Au point de vue des formes du phosphore, lorsqu'on applique des doses croissantes de P_2O_5 , l'augmentation de P Al est supérieure à l'augmentation de P Fe ; les auteurs concluent à une plus grande réactivité de l'ion Al, or il s'agit là aussi vraisemblablement d'un phénomène de surface (nous verrons que dans certains sols ferrallitiques, c'est l'inverse qui se produit).

Avec l'accroissement du temps de contact, il se produit une diminution de P Al et une augmentation de P Fe.

Ceci est dû à une plus grande solubilité de P Al ;

(1) Bull. A.F.E.S. 1968, juil. A, n° 4.

cette forme passe en solution et se refixe sous forme de P Fe beaucoup moins soluble.

Le rapport $\frac{P\ Al}{P\ Fe}$ diminue tout au long de l'expérience.

La transformation est relativement importante au cours des trois premières années (le rapport diminue à peu près de moitié) puis devient de plus en plus lente.

Dans le cas d'une forte dose d'apport, il peut donc se maintenir une quantité relativement élevée de P Al pendant un temps suffisamment long.

P Al continue à diminuer dans le cas de la faible dose sans augmentation de P Fe; ceci peut être dû aux exportations de P Al par les plantes.

Il existe une corrélation hautement significative entre les teneurs en P Al tout au cours de l'évolution, et les teneurs en P assimilable par la méthode Nord Caroline.

Le rapport des teneurs $\frac{P\ assimilable}{P\ Al}$ est d'environ

1
—, car il s'agit d'un réactif acide qui extrait difficilement cette forme de P_2O_5 .

Plus P Al est élevé, et plus le phosphore « assimilable » est élevé.

Afin d'obtenir des résultats plus rapidement, concernant l'évolution du phosphore avec le temps, les auteurs préconisent de faire bouillir des échantillons de sol dans l'eau pour accroître la vitesse de transformation de P Al en P Fe, mais il y a augmentation de la forme P Fe d'inclusion, alors que dans la nature l'augmentation de ce composé est très faible, même après cinq années.

En résumé, presque tous les essais d'enrichissement en phosphore, effectués sur les sols latéritiques du sud des Etats-Unis, indiquent une fixation immédiate importante sous forme de P Al considéré comme une forme utilisable par les plantes, et une évolution vers la forme P Fe moins soluble en fonction du temps. Cette évolution est lente.

En ce qui concerne les sols calcaires, les travaux de DUTIL et DUMON (1967) ont porté sur l'apport de superphosphates dans des sols de la Champagne Charentaise; ces engrais libèrent rapidement les ions phosphoriques, mais ne maintiennent une teneur élevée en P assimilable que pendant trois mois. Il y a diminution rapide de l'assimilabilité pendant les trois premiers mois, puis stabilisation. Les formes du phosphore n'ont pas été dosées, mais il se forme vraisemblablement des phosphates de chaux peu solubles, conformément au schéma présenté antérieurement.

L'action de la matière organique sur la fixation du phosphore est complexe et pourra faire l'objet d'une étude ultérieure.

Il faut considérer deux cas, le premier est celui

du phosphore organique proprement dit qui n'est pas immédiatement utilisable mais qui peut être mis à la disposition des plantes après minéralisation biologique.

ACQUAYE, au Ghana (1963) a étudié cette minéralisation qui peut être de 3 à 10 % à 27° pendant 70 jours. Cette proportion croît avec le pH, elle est parallèle à l'azote minéralisé mais néanmoins supérieure (le rapport N/P peut être utilisé pour juger la richesse en phosphore du sol). L'apport d'engrais azoté et même de phosphore accroît la quantité de P organique minéralisé.

Dans les sols organiques de Mangrove, d'après HESSE, la fixation sous forme organique est considérable et ce phosphore est pratiquement inutilisable, seul le P Al provenant des apports récents d'alluvions est assimilable.

Le second cas est celui des complexes mixtes P - Fe - Al - acides fulviques, étudié par LEVESQUE et SCHNITZER. L'assimilabilité de ces complexes dépend

du rapport $\frac{\text{métal}}{\text{acide fulvique}}$, elle est plus élevée lorsque ce rapport est bas.

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Dans cette revue bibliographique très incomplète, deux problèmes essentiels ont été traités, d'une part, l'appréciation du phosphore assimilable des sols par l'emploi de réactifs chimiques appropriés, d'autre part, l'évolution dans les sols du phosphore soluble ajouté, sa fixation sous différentes formes de solubilités variables et leurs transformations dans le temps.

Les résultats de ces différentes études peuvent s'appliquer au problème de la fumure phosphatée dans les sols tropicaux; il s'agit en effet, d'une part, de diagnostiquer le besoin variable des sols en phosphore en déterminant des seuils de carence, d'autre part, de connaître l'évolution des engrais phosphatés dans le sol et en particulier d'évaluer la proportion qui se fixe à l'état insoluble à court terme et à long terme. La fixation à court terme intéresse le problème des fumures annuelles, et la fixation à long terme conditionne les arrières fumures dans le cas d'apports massifs d'engrais.

En ce qui concerne le diagnostic des carences en phosphore, on a pensé pendant longtemps que la réponse des plantes aux engrais phosphatés était en raison inverse de la richesse des sols en phosphore « assimilable », c'est-à-dire extractibles par des réactifs conventionnels; en réalité, de très bonnes corrélations ont pu être établies dans de nombreux cas entre l'alimentation phosphatée des plantes et ces tests chimiques. Récemment encore des comparaisons de méthodes ont été effectuées (Van DIEST, New-Jersey, U.S.A. - GACHON, France) qui montrent que de nombreuses méthodes sont satisfaisantes, mais que leur valeur est différente suivant les sols auxquels on les applique. Un progrès a été réalisé grâce à la détermination des formes du phosphore qui permet de choisir dans l'arsenal des méthodes celles qui conviennent le mieux aux formes dominantes existant dans le sol considéré.

Par exemple :

- Réactifs acides pour les sols où P Ca domine ;
- Réactifs alcalins ou contenant du fluorure, pour les sols où P Al et P Fe dominent ;
- Réactifs complexants pour les sols à fort pouvoir de fixation, etc.

En réalité, la plupart des méthodes conviennent bien aux sols voisins de la neutralité ; ce sont principalement les sols calcaires et les sols acides qui posent des problèmes particuliers.

Cependant, malgré ces résultats encourageants, on s'est aperçu qu'il pouvait y avoir des différences de comportement des plantes suivant les conditions de cultures :

- cultures en pots ou cultures aux champs ;
- cultures en temps long ou cultures en temps court ;
- cultures en sols riches ou cultures en sols pauvres.

Enfin deux éléments peuvent intervenir dans la réponse aux engrais phosphatés :

- a) la richesse relative en éléments autres que le phosphore, en particulier en azote ;
- b) le blocage possible du phosphore ajouté sous forme non assimilable.

Les meilleures corrélations entre l'exportation en phosphore par les plantes et les analyses de sol ont été obtenues dans des cultures en pots et en serres.

En effet, dans un volume de sol limité, il y a une très bonne exploration du sol par les racines, et les plantes parviennent à extraire une quantité globale de P_2O_5 voisine de la quantité extractible avec les réactifs chimiques.

Il semble d'ailleurs que plus le sol est pauvre et plus la quantité extraite est en relation avec celle des réactifs relativement énergiques. Par contre, dans un sol riche, ce sont, par exemple, les extraits à l'eau

qui présentent les meilleures relations avec les exportations des plantes (Van DIEST).

En ce qui concerne le sol en place, les meilleures corrélations sont parfois données par des réactifs à faible pouvoir de dissolution (méthode OLSEN simple, méthode TRUOG), ceci dû au fait que les racines n'explorent que très partiellement le sol et utilisent en priorité les formes les plus mobiles.

Dans les essais en pots, on a pu également mettre en évidence le fait suivant : deux sols ayant à peu près la même quantité totale de phosphore extractible, mais possédant des capacités de fixation différentes, donnent des résultats différents avec une culture en temps court et des résultats voisins pour une culture en temps long.

Dans le sol à fort pouvoir de rétention, il n'y a que très peu de phosphore à l'état soluble, par contre, dans le sol à faible pouvoir de rétention, la fraction de phosphore soluble est importante ; c'est cette fraction qui agit en temps court sur la récolte ; avec le temps, l'exportation diminue dans la terre à faible rétention, et se maintient dans la terre à fort pouvoir de rétention, et les plantes rattrapent leur retard.

De même, les cultures à cycle court sont sensibles à la solubilité du phosphore, alors que les cultures à cycle long sont conditionnées par la quantité de phosphore extractible.

En ce qui concerne les cultures annuelles à fort rendement des pays tempérés, dans des sols souvent enrichis, c'est surtout la mobilité du phosphore qui semble importante, d'où les nombreuses techniques récentes comme la méthode des « dilutions isotopiques » qui mesure la rapidité des échanges isotopiques, donc la mobilité du phosphore du sol (BLANCHET). Dans les pays tropicaux dont les sols sont souvent pauvres en phosphore et à très fort pouvoir de rétention, il semble au contraire que la quantité totale de P_2O_5 extractible joue un rôle important sur les rendements, le pouvoir de rétention des sols étant fréquemment élevé.

DEUXIÈME PARTIE

MÉTHODE D'ÉTUDE DES FORMES DU PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX ET DE LEUR SOLUBILITÉ

1) APPLICATION DE LA MÉTHODE CHANG ET JACKSON AUX SOLS TROPICAUX

Depuis 1963, un certain nombre d'études ont été réalisées aux S.S.C. de BONDY, sur l'application de la méthode de fractionnement de CHANG et JACKSON aux divers sols tropicaux, d'Afrique, de Madagascar ou des Antilles. Plusieurs publications ont été effectuées sur ce sujet (DABIN, 1963-1964) ; en outre, une méthode de dosage automatique (par l'autoanalyseur Technicon) a été mise au point (DABIN, 1965), permettant

d'utiliser pratiquement cette technique autrefois fort longue, pour l'analyse de nombreux échantillons.

Ces études ont montré que dans les sols tropicaux à pH acide (4.5-6), de type ferrallitique ou ferrugineux, la richesse du sol en phosphore lié à Al (P Al) était assez généralement en relation avec le niveau de fertilité et que la réponse aux engrais phosphatés se situait pour les valeurs faibles de cette forme, bien qu'il soit encore difficile de fixer des limites précises.

Parmi les autres formes, le phosphore lié au calcium (P Ca) est souvent très faible, mais varie dans le même sens que P Al.

Le phosphore lié au Fe (P Fe) est quantitativement le plus élevé dans la majorité des cas, il présente parfois une relation avec la fertilité des sols lorsqu'il varie dans le même sens que P Al, mais dans d'autres cas il varie en sens inverse, et il peut présenter des teneurs très élevées dans des sols fortement carencés en phosphore, où les teneurs en P Al et P Ca sont par contre très basses (sols ferrallitiques des Antilles répondant aux engrais phosphatés) (DABIN 1964).

Lorsque le pH des sols croît vers la neutralité, la proportion relative de P Ca augmente fortement et est en relation avec la fertilité, de même P Al augmente mais dans des proportions moindres et varie dans le même sens que P Ca, par contre, la proportion relative de P Fe diminue, mais ses variations en fonction de la fertilité sont dans le même sens que P Al et P Ca.

Dans les sols à pH supérieur à 7, ou les sols calcaires, le phosphore lié au calcium peut atteindre des valeurs très élevées même dans des sols carencés en phosphore, par contre, la fertilité reste en relation avec la teneur en P Al et d'une façon moins évidente avec P Fe (Sols du Salvador, DABIN, 1967).

En résumé, quel que soit le pH du sol, P Al varie généralement dans le même sens que la fertilité.

P Fe ne présente aucune relation avec la fertilité dans les sols très acides, il présente une relation dans les sols neutres ou calcaires, mais, moins nette que P Al.

P Ca présente une relation avec la fertilité dans les sols acides ou neutres, il n'en présente aucune dans les sols calcaires.

Ces conclusions ne constituent qu'une première approximation, elles auraient besoin d'être reprises systématiquement; les relations constatées entre phosphore et fertilité sont nettes en valeur relative à l'intérieur d'un même type de sol, mais lorsqu'on passe d'un type de sol à l'autre, les valeurs absolues deviennent souvent très différentes.

Ces études ont montré que, s'il est possible dans le cas des sols acides de définir le phosphore minéral utilisable par la somme P soluble + P Al + P Ca, en négligeant totalement P Fe, dans les sols proches de la neutralité ou calcaires, il n'est pas possible de connaître par la méthode CHANG et JACKSON la fraction de P Ca ou P Fe qui peut être considérée comme utilisable, d'où la nécessité d'une autre méthode d'appréciation du phosphore utilisable.

2) MISE AU POINT D'UNE MÉTHODE D'APPRÉCIATION DU PHOSPHORE MINÉRAL "EXTRACTIBLE"

Nous disons phosphore minéral « extractible », plutôt que phosphore « assimilable » pour dénommer cette réserve en phosphore minéral, extraite par des réactifs chimiques modérés, et à laquelle la plante peut avoir plus ou moins accès dans des conditions favorables comme des cultures en pots de longue durée.

Compte tenu de toutes les considérations précédentes, il nous a semblé que la méthode OLSEN modifiée n° 3 (JACKSON, VACHAROTOYAN, ALBAN, PETERSON), 1964, correspondait le mieux comme technique d'extraction simple, car le réactif comprend un mélange de fluorure d'ammonium 0,5 N, de bicarbonate de soude 0,5 N et de soude en quantité suffisante pour obtenir pH = 8,5. La concentration en FNH₄ est la même que dans la méthode CHANG et JACKSON ainsi que le temps d'agitation (1 heure); on peut donc admettre que la fraction P Al est extraite en totalité ainsi que P soluble, quant à P Fe et P Ca les fractions les plus solubles seulement peuvent être extraites par action de la soude diluée et de l'ion bicarbonate en temps court. Cette technique (FNH₄ 0,5 N + CO₂ NaH 0,5 N + NaOH q.s. pH 8,5) a été appliquée systématiquement à de nombreux sols depuis 1965, une note a été publiée en novembre 1967 (au colloque sur la fertilité des sols tropicaux à Tananarive, DABIN), une technique de dosage automatique a été mise au point (DABIN, 1967).

Des comparaisons ont été effectuées avec des méthodes plus classiques (TRUOG - DYER) qui se sont avérées satisfaisantes, des relations ont été établies avec la fertilité et la réponse aux engrais dans quelques cas précis.

En ce qui concerne les engrais phosphatés, il semble que les limites de réaction données par la méthode sont variables en fonction de la richesse en azote total des sols, c'est là une observation empirique, mais on peut l'interpréter par le fait que dans les sols pauvres, la fertilité potentielle du sol croît avec le taux de matière organique, parallèle à l'azote

C

total (— = 10). La consommation totale en P₂O₅ ex-
N
trait du sol augmente d'autant plus que la fertilité potentielle est plus élevée; par ailleurs, les besoins des plantes peuvent être très variables, ce qui fait que les limites de réaction aux engrais phosphatés sont variables suivant les sols et suivant les plantes. Cette limite de réaction a été fixée empiriquement

P₂O₅

pour un rapport — variant de 0,1 à 0,05.
N

3) EXEMPLE

Des essais d'engrais phosphatés ont été effectués par l'I.R.C.T. (Institut de Recherches du Coton et Textiles), en utilisant une méthode dite « soustractive » qui consiste à comparer une formule complète N - P - K - S) avec une formule carencée en phosphore. Les résultats précédents proviennent d'une expérience sur cotonnier dans des sols ferrugineux de Côte d'Ivoire et de R.C.A.

Le rendement des parcelles sans engrais phosphatés est d'autant plus faible que la teneur en P₂O₅ OLSEN est plus faible. La richesse en phosphore des feuilles montre une relation encore plus nette avec le P₂O₅ « extractible ». La relation est nette également

P₂O₅ OLSEN

si l'on considère le rapport —; les sols
N total

Tableau 1. — *Essai d'engrais sur cotonnier - I.R.C.T. - Côte d'Ivoire, République Centrafricaine.*

Emplacement	BEOUMI	NIAKA	KANI	BAHIAKRO	DALOA	BOUNA	GOTCHELÉ	
Rendement % de la formule complète	95	92	89	86	61	52	Carence très forte en P ₂ O ₅	
Analyse des feuilles - P %	1,64	0,64	0,36	0,24	0,21	0,31		
P extractible - OLSEN modifiée - P ₂ O ₅ ppm	232	70	60	48	30	20	20	29
Fractionnement CHANG et JACKSON - P soluble ppm P ₂ O ₅	23	6,9	11,5	16,1	9,2	9,2	2,3	4,6
P Al - ppm P ₂ O ₅	225	63	59	36	21	17	12	23
P Ca - ppm P ₂ O ₅	94	25	27	25	13	16	11,5	11
P Fe - ppm P ₂ O ₅	271	101	96	50	57	28	37	41
N total ‰	1,2	0,6	0,96	1,58	1,7	0,62	0,66	0,73
P ₂ O ₅ OLSEN	0,2	0,12	0,062	0,03	0,018	0,032	0,03	0,04
N								

pauvres correspondent à un rapport inférieur à 0,05.

Il est à noter également que les différentes valeurs P Al, P Fe, P Ca varient à peu près dans le même sens ; cela est dû au fait que les sols ont des pH faiblement acides à neutre (pH entre 6 et 7).

Cependant la valeur du P « extractible » OLSEN correspond à peu près à la somme P Al + P soluble.

Les proportions relatives des différentes formes rapportées en % du total sont les suivantes :

Tableau 2. — *Pourcentages relatifs des différentes formes de phosphore.*

Emplacement	BEOUMI	NIAKA	KANI	BAHIAKRO	DALOA	BOUNA
Somme du P ₂ O ₅ (CHANG et JACKSON) ppm	614	196	195	128	102	71
P ₂ O ₅ OLSEN %	38	36	31	37	30	28
P Soluble %	3,8	3,5	5,8	12,5	9	13
P Al %	37	32	30	28	21	24
P Ca %	15	12,7	14	19,5	13,5	22,5
P Fe %	45	51	49	40	51	41
pH	6,4	6	6,7	7,4	5,8	7

Malgré d'importantes variations du P₂O₅ minéral total (CHANG et JACKSON) les proportions relatives des différentes formes sont peu variables, ceci est dû à la nature des sols de type ferrugineux tropical, assez peu différente d'un sol à l'autre, et également au pH, peu variable ; noter cependant que le pourcentage maximum de P soluble et P Ca s'observe pour les échantillons Bahiokro et Bouna dont le pH est égal ou supérieur à 7. En ce qui concerne P OLSEN, sa proportion varie assez peu, c'est peut-être la raison pour laquelle on observe une bonne relation avec l'alimentation des plantes. Donc, quel que soit la richesse en phosphore du sol, il semble que les proportions relatives des différentes formes dépendent essentiellement de la nature du sol et du pH ; on peut donc émettre l'hypothèse qu'il s'agit d'une sorte d'équilibre spécifique plus ou moins indépendant de la richesse du sol. C'est cette propriété qui sera utilisée dans la suite du mémoire pour déterminer l'évolution à long terme des formes de fixation du phosphore.

4) RÉSUMÉ

L'étude des relations entre le P₂O₅ extractible (OLSEN) et la fertilité est limitée à un seul exemple et peut être poursuivie d'une façon beaucoup plus détaillée, mais ce n'est pas le sujet essentiel de la présente étude qui consiste surtout à déterminer l'évolution à long terme des différentes formes du phosphore dans des sols enrichis artificiellement en phosphore soluble. Les chapitres précédents ont pour but de montrer l'intérêt du test de solubilité qui a été retenu, c'est-à-dire la méthode OLSEN modifiée.

TROISIÈME PARTIE

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA FIXATION ET DE L'ÉVOLUTION DU PHOSPHORE SOLUBLE APPLIQUÉ AU SOL (Essais en laboratoire)

1) BUT DE L'ÉTUDE

Divers essais ont été réalisés pour étudier les transformations dans le sol des apports de phosphore soluble, conformément aux expériences citées précédemment dans l'introduction ; en particulier, dans les sols tropicaux, les oxydes de fer et d'aluminium peuvent avoir une grande influence sur l'adsorption et la rétrogradation des ions phosphoriques.

Cette étude a un but à la fois théorique et pratique, car un des principaux problèmes qui reste posé dans la fertilisation des sols tropicaux est le devenir des engrais phosphatés après leur application dans le sol.

Les fumures dites de « redressement » font appel à de fortes quantités d'éléments, elles doivent pour être rentabilisées présenter un maximum d'utilisation l'année de leur application et conserver un arrière effet pour maintenir la fertilité potentielle du sol le plus longtemps possible.

L'efficacité des fumures annuelles et l'action importante des arrière-fumures ont été montrées dans des essais sur sols ferrallitiques à Madagascar (VELLY), la fixation irréversible du phosphore n'est donc pas totale, et elle est lente, mais il peut être utile de vérifier si elle ne varie pas d'un sol à l'autre.

Nous avons cherché à mettre au point un procédé rapide permettant d'évaluer l'importance de cette fixation en fonction des divers types de sol.

Beaucoup d'essais anciens se contentaient d'étudier l'équilibre phosphore en solution/phosphore adsorbé, mais pour les sols tropicaux cette technique ne convient pas, car le pouvoir d'adsorption est intense, bien que le phosphore reste utilisable par les plantes ; nous avons préféré étudier l'équilibre phosphore fixé et phosphore extractible, en utilisant la méthode OLSEN modifiée, et en interprétant les résultats en fonction des différentes formes fractionnées par la méthode CHANG et JACKSON, ce qui a l'intérêt de faire apparaître le phosphore soluble et le phosphore rétrogradé.

2) TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

Les essais ont été effectués dans des boîtes de Pétri ou dans des boîtes cylindriques ; ils ont porté sur des échantillons de 50 g de terre tamisés à 2 mm. Une première série d'expériences a été poursuivie pendant une durée d'un mois et demi (45 jours).

Ces échantillons ont été enrichis à l'aide d'une solution de phosphate monopotassique correspondant à des quantités de P_2O_5 dans le sol de :

0 - 100 - 200 - 400 - 600 - 800 - 1000 ppm.

Donc, chaque essai a porté sur sept échantillons d'un même sol, diversement enrichis ; par ailleurs, ces échantillons ont été étudiés en double, les uns étant portés à une humidité moyenne, les autres recou-

verts d'une lame d'eau (pour représenter les conditions de la rizière).

Des prélèvements ont été effectués à des temps variables, trois jours, quinze jours, six semaines, après enrichissement en P_2O_5 soluble.

Les échantillons ont été séchés à 45° sous infrarouge, puis broyés, et analysés.

Les déterminations suivantes ont été effectuées :

— P_2O_5 extractible - OLSEN modifiée ;

— Fractionnement par la méthode CHANG et JACKSON :

P_2O_5 soluble,

P_2O_5 Al,

P_2O_5 Ca,

P_2O_5 Fe ;

— Enfin, le phosphore total par l'acide nitrique concentré à chaud a été déterminé dans cette première série d'expériences.

Les sols étudiés dans cette première série de longue durée ont été deux sols du Tchad :

— un vertisol,

— un sol hydromorphe sableux.

Tableaux 3, 4, 5, 6.

Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.

3) RÉSULTATS OBTENUS

a) Fixation du phosphore sur le sol

Les résultats sont portés dans les tableaux 3-4-5-6 et représentés graphiquement, c'est-à-dire le P_2O_5 OLSEN et les différentes formes en ordonnée en fonction du P_2O_5 total en abscisse (fig. 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Les deux sols (hydromorphe et vertisol) sont très pauvres en phosphore au départ :

— Le sol hydromorphe montre une dominance du phosphore lié au fer ;

— Le vertisol présente une dominance égale de P Fe et P Ca.

L'enrichissement par P_2O_5 soluble, après trois jours de contact, est intéressant à considérer graphiquement ; l'accroissement du phosphore extractible OLSEN, ainsi que des différentes formes, est proportionnel à la quantité de P_2O_5 ajoutée. En première approximation, on observe un faisceau de droites, ce qui a pour premier résultat de démontrer la précision des analyses (certaines irrégularités des courbes peuvent être imputées à l'hétérogénéité des prélèvements). L'allure linéaire est surtout nette pour le P_2O_5 extractible OLSEN (à part quelques erreurs). Le phosphore lié à l'aluminium augmente aussi linéairement, la réactivité de l'ion Al avec le phosphore semble très importante dans les deux sols et supérieure à celle des autres cations.

Tableau 3. — Sols du Tchad
Fixation du phosphore sous différentes formes dans des sols diversement enrichis,
et en fonction du temps.

Sol hydromorphe sableux exondé - ppm de P ₂ O ₅							
3 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	23	36	119	110	230	276
P ₂ O ₅ Al	9	99	142	248	314	430	529
P ₂ O ₅ Fe	37	64	64	78	73	195	101
P ₂ O ₅ Ca	18	23	25	21	48	27	23
P ₂ O ₅ OLSEN	28	162	230	428	550	750	950
P ₂ O ₅ Total	129	295	354	554	719	385	1 062
15 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	9	25	59	110	151	234
P ₂ O ₅ Al	14	94	151	266	391	506	598
P ₂ O ₅ Fe	25	46	50	64	73	87	96
P ₂ O ₅ Ca	4,6	6,9	6,9	9,2	9,2	11,5	13,8
P ₂ O ₅ OLSEN	20	125	200	360	550	650	850
P ₂ O ₅ Total	129	259	354	495	684	814	1 026
45 jours							
P ₂ O ₅ soluble	2,3	9,4	18,8	54	84	127	165
P ₂ O ₅ Al	14	80	134	261	391	542	708
P ₂ O ₅ Fe	47	70	80	89	132	115	127
P ₂ O ₅ Ca	11	16	14	21	25	23	47
P ₂ O ₅ OLSEN	22	100	165	340	500	650	800
P ₂ O ₅ Total	153	306	318	472	649	802	1 003

La réactivité du fer et du calcium est nettement plus faible, et semble parfois tendre vers un palier, mais elle est néanmoins plus importante dans le vertisol que dans le sol hydromorphe.

La fixation du phosphore sur le calcium est la plus faible dans les deux cas, mais supérieure dans le vertisol par rapport au sol hydromorphe.

Le P₂O₅ soluble n'est pas négligeable dans les deux cas, la représentation n'est pas tout à fait linéaire et la pente semble augmenter avec la dose au-delà d'un certain seuil, surtout dans le cas du vertisol.

Néanmoins pour simplifier, et dans la limite des doses de phosphore utilisées, les différentes repré-

sentations graphiques seront assimilées à des droites, la pente moyenne de ces droites représentant le pourcentage de P₂O₅ fixé sous chaque forme, et la réactivité des différents cations fixateurs.

Après 15 jours et 6 semaines d'incubation, l'allure générale des graphiques change peu, les représentations graphiques demeurent à peu près linéaires, mais les pentes de certaines droites se modifient; c'est ainsi que l'on voit diminuer la pente du P soluble, alors que les pentes de P OLSEN et de P Al se rapprochent l'une de l'autre (ceci est surtout visible dans le sol hydromorphe).

La pente du P Fe paraît aussi augmenter légèrement dans certains cas.

Tableau 4. — Sols du Tchad
Fixation du phosphore sous différentes formes dans des sols diversement enrichis,
et en fonction du temps.

Sol hydromorphe sableux inondé - ppm de P ₂ O ₅							
3 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	20	46	80	115	170	195
P ₂ O ₅ Al	13	87	149	239	289	381	460
P ₂ O ₅ Fe	37	55	69	83	87	92	103
P ₂ O ₅ Ca	21	23	23	23	27	23	23
P ₂ O ₅ OLSEN	32	142	236	384	500	650	750
P ₂ O ₅ Total	141	271	377	591	613	778	920
15 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	0	11,5	20,7	62,1	87,4	105
P ₂ O ₅ Al	18	108	207	303	391	483	598
P ₂ O ₅ Fe	29	46	57	69	78	87	110
P ₂ O ₅ Ca	6,9	9,2	9,2	11,5	9,2	11,5	16,1
P ₂ O ₅ OLSEN	30	120	240	375	500	650	750
P ₂ O ₅ Total	118	236	377	495	613	719	826
45 jours							
P ₂ O ₅ soluble	4,7	4,7	7	14,1	23,6	40,1	112
P ₂ O ₅ Al	28	80	160	283	325	460	991
P ₂ O ₅ Fe	47	89	75	108	106	148	195
P ₂ O ₅ Ca	9,4	28	19	19	19	33	49
P ₂ O ₅ OLSEN	27	85	165	280	350	448	600
P ₂ O ₅ Total	129	236	306	495	590	684	861

Ces observations semblent montrer que dans les limites des teneurs en P₂O₅ ajoutées, le pourcentage de fixation sous différentes formes et l'évolution de la fixation avec le temps semblent relativement indépendante de la quantité de phosphore mais sont fonction essentiellement de la nature du sol.

Une autre conclusion pratique est que l'on peut déterminer la pente de fixation pour chaque forme du phosphore en choisissant un point correspondant à un enrichissement moyen (par exemple 300 ppm), ce qui réduit considérablement le nombre des analyses.

b) Evolution du pourcentage de fixation avec le temps

(Tableaux 7, 8, 9, 10 ; figures 7, 8, 9, 10.)

Pour étudier les variations de la fixation du phosphore en fonction du temps, les divers pourcentages relatifs des formes du phosphore ont été calculés par rapport à la quantité de phosphore ajouté, ce qui revient à déterminer les pentes des droites.

Ces pentes ont été calculées pour deux doses : 300 ppm et 1 000 ppm, et représentées graphiquement en fonction de la durée d'incubation : 3 jours, 15 jours, 45 jours.

Les pourcentages relatifs de phosphore ont été également calculés dans le sol non enrichi, par rapport à la somme des différentes formes déterminées par la méthode CHANG et JACKSON.

La dose de 300 ppm P₂O₅ représente environ 600 kg/ha, c'est-à-dire des doses d'engrais phosphatés

Tableau 5. — Sols du Tchad
Fixation du phosphore sous différentes formes dans des sols diversement enrichis,
et en fonction du temps.

Vertisol exondé - ppm de P ₂ O ₅							
3 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	16	39	165	270	440	620
P ₂ O ₅ Al	8,7	110	170	330	420	510	600
P ₂ O ₅ Fe	44,5	92	110	138	165	170	190
P ₂ O ₅ Ca	44	39	39	60	80	74	64
P ₂ O ₅ OLSEN	22	152	227	550	700	900	1 200
P ₂ O ₅ Total	306	495	613	1 038	1 274	1 416	
15 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	6,9	27,6	110,4	165,6	276	506
P ₂ O ₅ Al	6,9	103	179	370	400	506	590
P ₂ O ₅ Fe	27,6	78,2	101,2	147	161	172	179
P ₂ O ₅ Ca	27,6	39,1	48,3	48,3	73,6	73,6	82,8
P ₂ O ₅ OLSEN	12	125	220	440	550	700	1 100
P ₂ O ₅ Total	318	483	649	967	1 109	1 357	
45 jours							
P ₂ O ₅ soluble	2,3	9,4	14	56	75	112	134
P ₂ O ₅ Al	9,4	73	127	240	311	382	387
P ₂ O ₅ Fe	44	89	106	136	165	193	188
P ₂ O ₅ Ca	54	51	94	84	118	193	200
P ₂ O ₅ OLSEN	18	95	150	290	360	448	452
P ₂ O ₅ Total	318	590	637	767	885	1 180	1 203

pouvant correspondre à des fumures de redressement. Les pentes des droites peuvent être considérées comme assez représentatives du mode de fixation pour les apports normaux de phosphore soluble. Une première constatation est que l'évolution des formes du phosphore est faible au cours des 45 jours d'incubation, surtout dans le cas des sols sableux et en milieu exondé où l'adsorption sous forme de P Al continue à augmenter et où P soluble est peu variable. Cette évolution s'inverse légèrement dans le cas des sols sableux inondés où l'on constate une amorce assez nette de diminution du phosphore extractible OLSEN et du phosphore soluble.

Dans les vertisols, soit exondés, soit inondés, l'évolution en 45 jours est faible également. On note aussi

une amorce de diminution du phosphore extractible OLSEN qui est parallèle à P Al, une diminution du phosphore soluble, et une amorce d'augmentation du phosphore lié au calcium.

Pour la dose 1 000 ppm, l'allure générale des graphiques est peu différente :

— dans le sol sableux inondé, on note une diminution de P OLSEN et de P soluble, et une amorce d'augmentation de P Fe ;

— dans le vertisol, par contre, c'est dans l'essai exondé que l'évolution semble la plus nette, diminution de P OLSEN, diminution faible de P soluble, augmentation nette de P Ca, amorce d'augmentation de P Fe.

Tableau 6. — Sols du Tchad
Fixation du phosphore sous différentes formes dans des sols diversement enrichis,
et en fonction du temps.

Vertisol inondé - ppm de P ₂ O ₅							
3 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	32,5	99	177	362	550	550
P ₂ O ₅ Al	5,8	165	315	370	565	640	740
P ₂ O ₅ Fe	42	105	147	160	202	183	215
P ₂ O ₅ Ca	46	64	78	120	39	48	51
P ₂ O ₅ OLSEN	20	204	386	550	900	1 150	1 250
P ₂ O ₅ Total	335	665	910	1 146	1 416		
15 jours							
P ₂ O ₅ soluble	0	9,2	50,6	128	280	446	460
P ₂ O ₅ Al	6,9	128	253	372	464	644	690
P ₂ O ₅ Fe	25,3	87,4	124	158	179	193	207
P ₂ O ₅ Ca	27,6	41	46	66	76	85	80
P ₂ O ₅ OLSEN	12	140	274	490	800	1 050	1 150
P ₂ O ₅ Total	342	554	731	967	1 368		
45 jours							
P ₂ O ₅ soluble	4,7	7	14,1	42	89	127	162
P ₂ O ₅ Al	9,4	71	125	297	420	495	708
P ₂ O ₅ Fe	52	94	108	165	200	295	259
P ₂ O ₅ Ca	40	51	61	84	103	113	132
P ₂ O ₅ OLSEN	25	85	148	325	475	650	750
P ₂ O ₅ Total	306	460	566	837	1 026	1 180	

Tableau 7. — Pourcentages relatifs de fixation.

	Sol hydromorphe - enrichissement 300 ppm de P ₂ O ₅							
	Sol exondé				Sol inondé			
	Départ	3 jours	15 jours	45 jours	Départ	3 jours	15 jours	45 jours
P soluble	0	16	11	16	0	19	5	3
P Al	14	59	66	76	18	58	73	70
P Fe	58	12	11,3	13	52	13	11	17
P Ca	25,5	3,2	1,1	3,3	29	0,9	0,9	3
P extract. OLSEN ..	44	90	80	100	45	86	80	70

Tableau 8

Sol hydromorphe - enrichissement 1 000 ppm de P ₂ O ₅								
	Sol exondé				Sol inondé			
	Départ	3 jours	15 jours	45 jours	Départ	3 jours	15 jours	45 jours
P soluble %	0	30	25	19	0	26	15	7,4
P Al %	14	56	68	81	18	58	81	82
P Fe %	58	6,9	7,8	11	52	8,2	9,5	19
P Ca %	25	0,86	0	2,4	29	1	2,8	4,9
P extrac. OLSEN .. %	44	91	94	92	45	96	100	81

Tableau 9. — Pourcentages relatifs de fixation.

Vertisol - enrichissement 300 ppm de P ₂ O ₅								
	Sol exondé				Sol inondé			
	Départ	3 jours	15 jours	45 jours	Départ	3 jours	15 jours	45 jours
P soluble %	0	13	8,4	3,7	0	10	4,3	3,6
P Al %	9	53	51	37	6,2	48	57	44
P Fe %	46	21	23	20	45	19	29	22
P Ca %	45	1	6	13,5	49	5,4	6,3	8,2
P extrac. OLSEN .. %	22	67	62	42	21	56	60	47

Tableau 10

Vertisol - enrichissement 1 000 ppm de P ₂ O ₅								
	Sol exondé				Sol inondé			
	Départ	3 jours	15 jours	45 jours	Départ	3 jours	15 jours	45 jours
P soluble %	0	22	21	14	0	22	20	15
P Al %	9	44	49	42	6,2	45	58	55
P Fe %	46	12,5	18	18	45	17	21	24
P Ca %	45	1	6	16	49	7	7	8
P extrac. OLSEN .. %	22	70	68	51	21	65	74	64

Ces amorces d'évolution après 45 jours sont peu significatives, mais une constatation intéressante est qu'on les retrouve considérablement amplifiées dans la partie gauche des graphiques où l'on compare la fixation à court terme avec l'équilibre à long terme des différentes formes du phosphore dans le sol non enrichi, c'est-à-dire diminution du P extractible

OLSEN et du P soluble, augmentation du P Fe et du P Ca. Il faut noter que l'amorce d'augmentation du P Fe s'observe dans le sol sableux inondé, et cette augmentation est maximum dans le sol non enrichi ; par contre, l'amorce d'augmentation de P Ca est nette dans le vertisol exondé et correspond à une forte augmentation du P Ca dans le sol non enrichi.

En résumé, on peut considérer que les échantillons non enrichis, c'est-à-dire qui n'ont pas reçu d'engrais depuis longtemps, représentent un équilibre à long terme des formes du phosphore vers lequel évoluent les sols enrichis mais d'une façon très lente. Seul le phosphore soluble semble montrer une évolution relativement rapide dans les échantillons étudiés. Cette évolution lente confirme les résultats de SHELTON et COLEMAN cités en bibliographie (leurs essais ont porté sur huit années); c'est d'ailleurs grâce à l'appui de ces travaux qu'il est possible d'émettre l'hypothèse précédente sur l'évolution à long terme des phosphates de fer en particulier.

Il serait nécessaire, bien entendu, d'effectuer des essais de beaucoup plus longue durée dans les boîtes de Pétri, mais la lenteur de ces expériences leur enlève beaucoup d'intérêt pratique.

En revanche, un intérêt pratique immédiat est de montrer que l'adsorption et la fixation du phosphore

sur le sol après trois jours est assez représentative de l'équilibre des formes de P_2O_5 pendant une période de quarante-cinq jours qui est tout de même importante pour la croissance des végétaux, en particulier le phosphore le plus soluble étant prélevé de préférence par les plantes au cours des premières phases de végétation.

Par ailleurs, la fixation du phosphore après trois jours de contact est différente d'un sol à l'autre; c'est ainsi que le P_2O_5 extractible OLSEN représente 90 % du phosphore soluble ajouté dans le sol hydromorphe sableux, alors qu'il varie entre 60 et 70 % dans le vertisol, soit une perte de l'ordre de 25 à 30 %, dès l'application.

L'équilibre des formes dans le sol sans engrais donne une idée de la rétrogradation maximum de P_2O_5 au bout d'un temps très long. P_2O_5 OLSEN diminue jusqu'à 44 % dans le sol hydromorphe sableux et 22 % dans le vertisol.

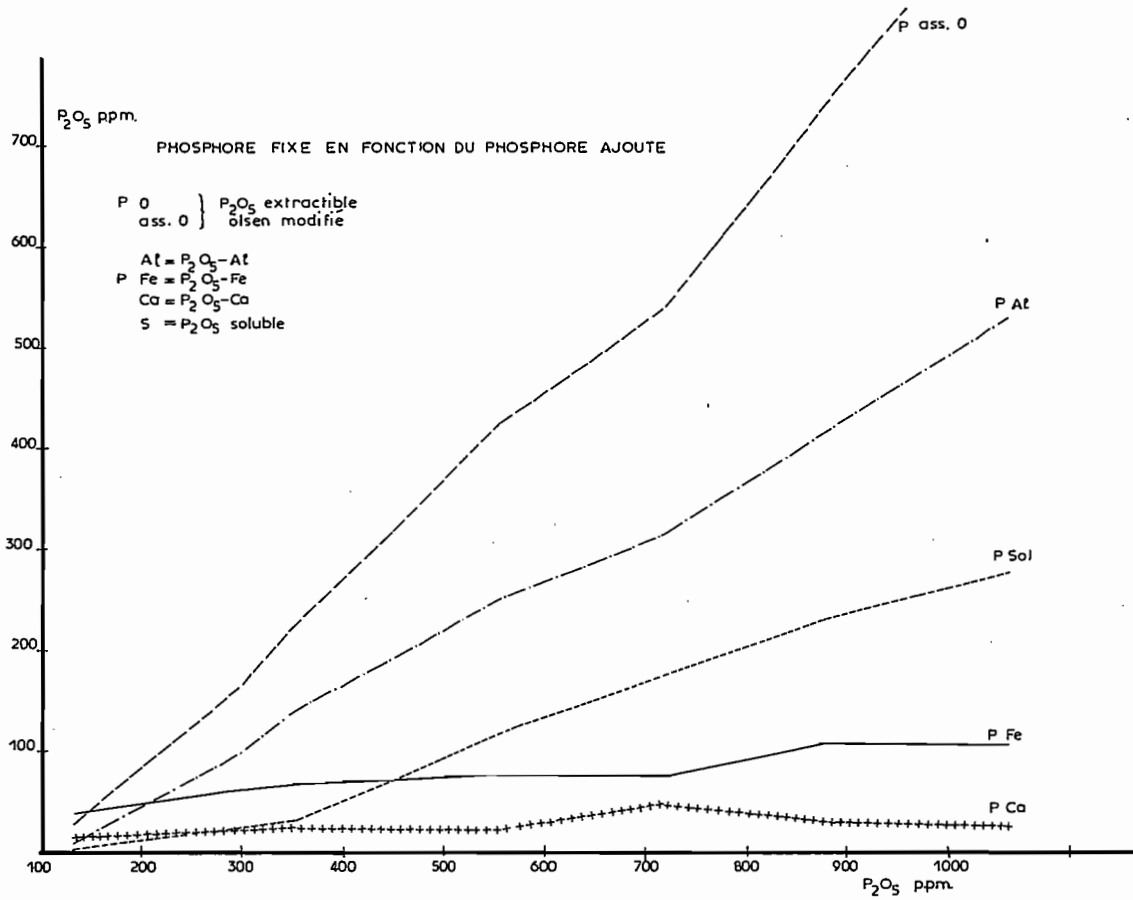


Fig. 1. — Sol hydromorphe exondé sableux. Contact 3 jours.

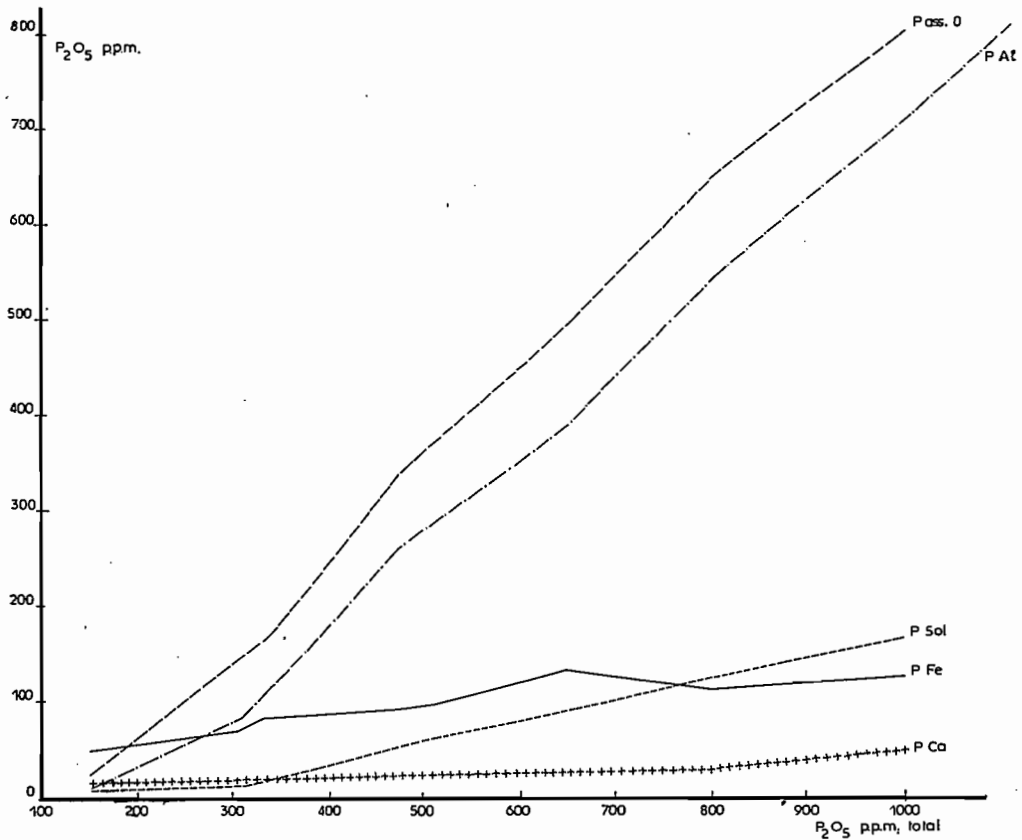


Fig. 2. — Sol hydromorphe sableux exondé. Contact 45 jours.

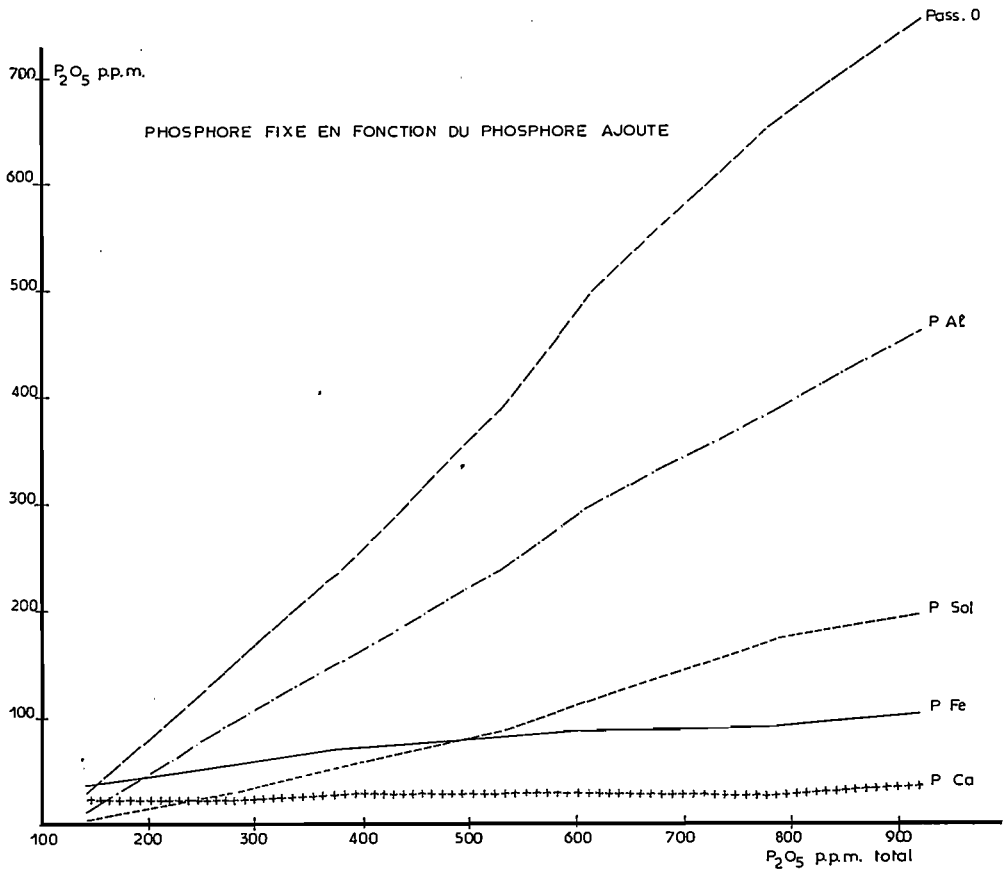


Fig. 3. — Sol hydromorphe sableux inondé. Contact 3 jours.

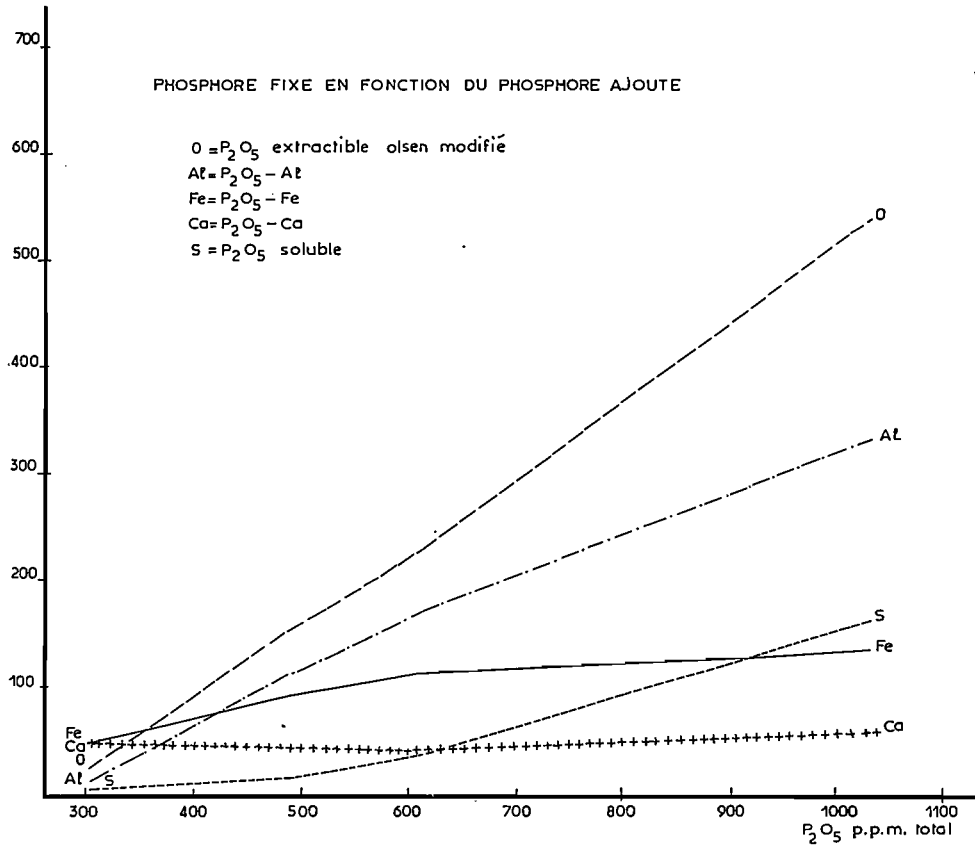


Fig. 4. — Vertisol exondé. Contact 3 jours.

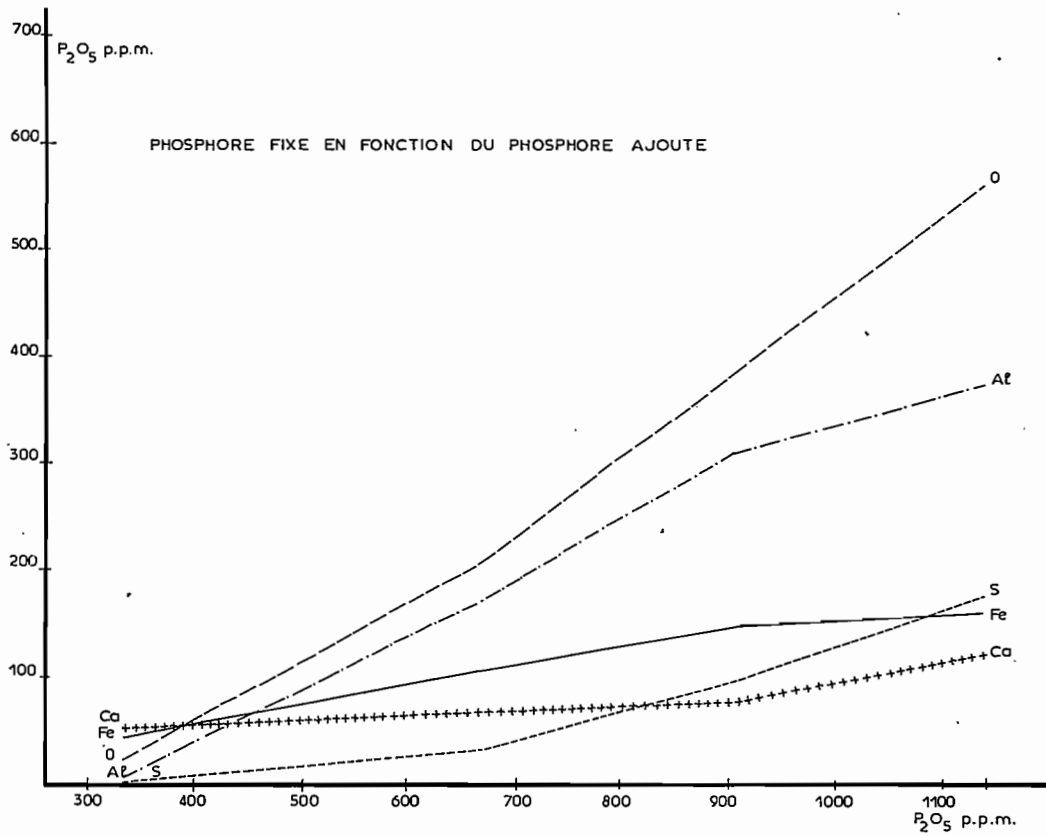


Fig. 5. — Vertisol inundé. Contact 3 jours.

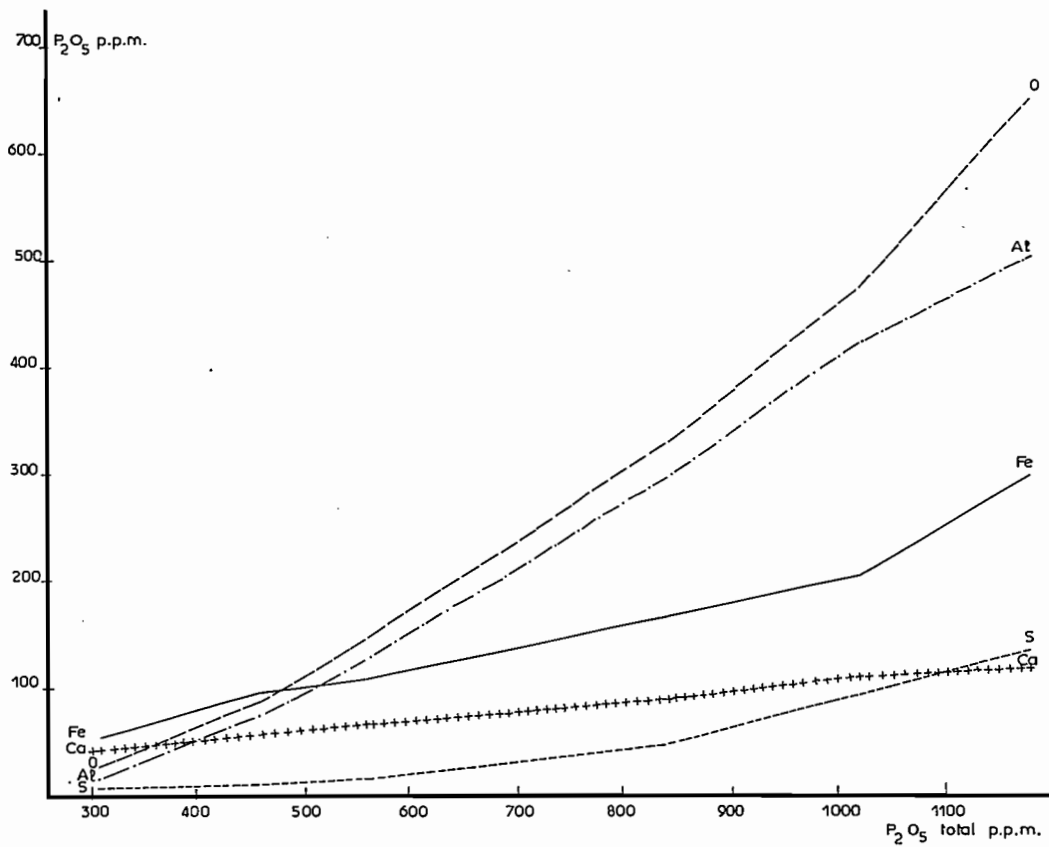


Fig. 6. — Vertisol inundé. Contact 45 jours.

SOL HYDROMORPHE SABLEUX

SOL A HUMIDITE MOYENNE

SOL ENRICHI

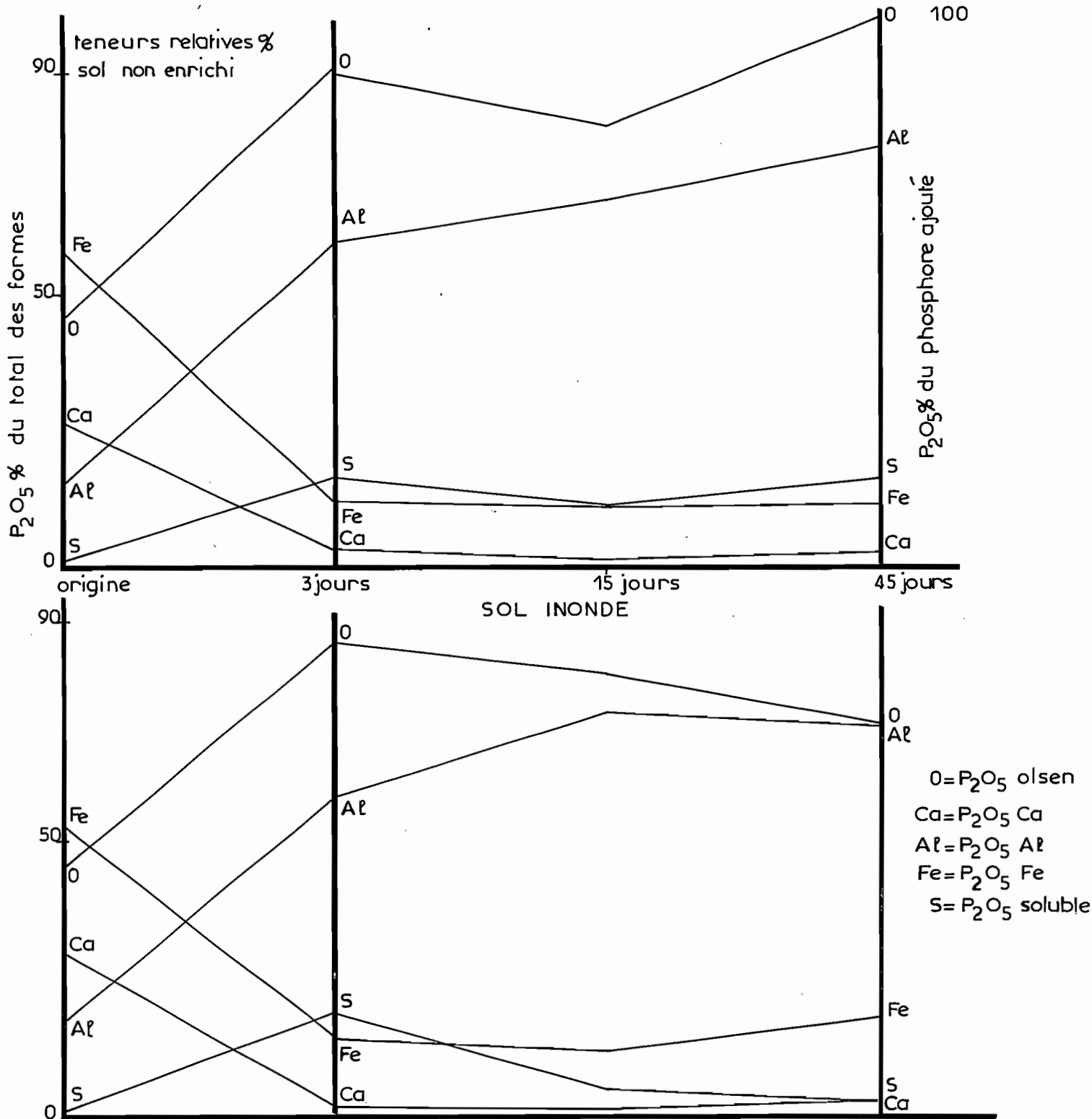
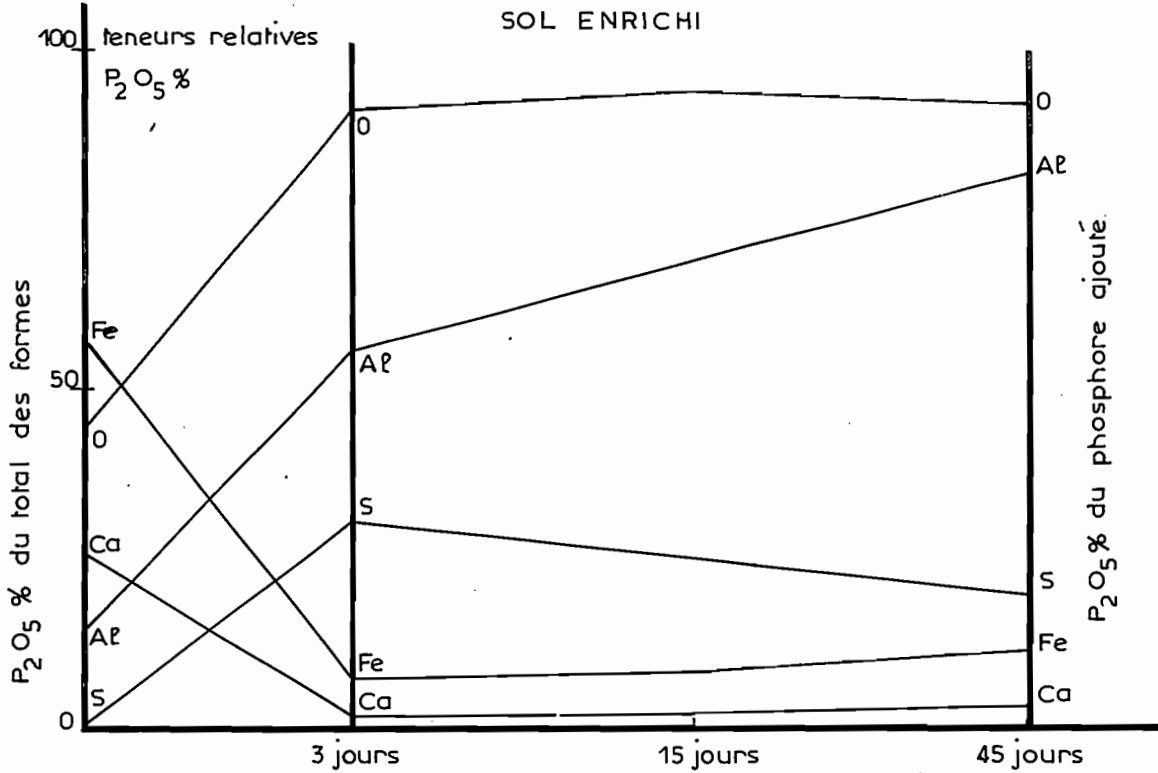


Fig. 7. — Evolution du phosphore avec le temps. Doses 0 et 300 p.p.m. P_2O_5 .

SOL HYDROMORPHE SABLEUX
HUMIDITE MOYENNE
SOL ENRICHI



SOL INONDE

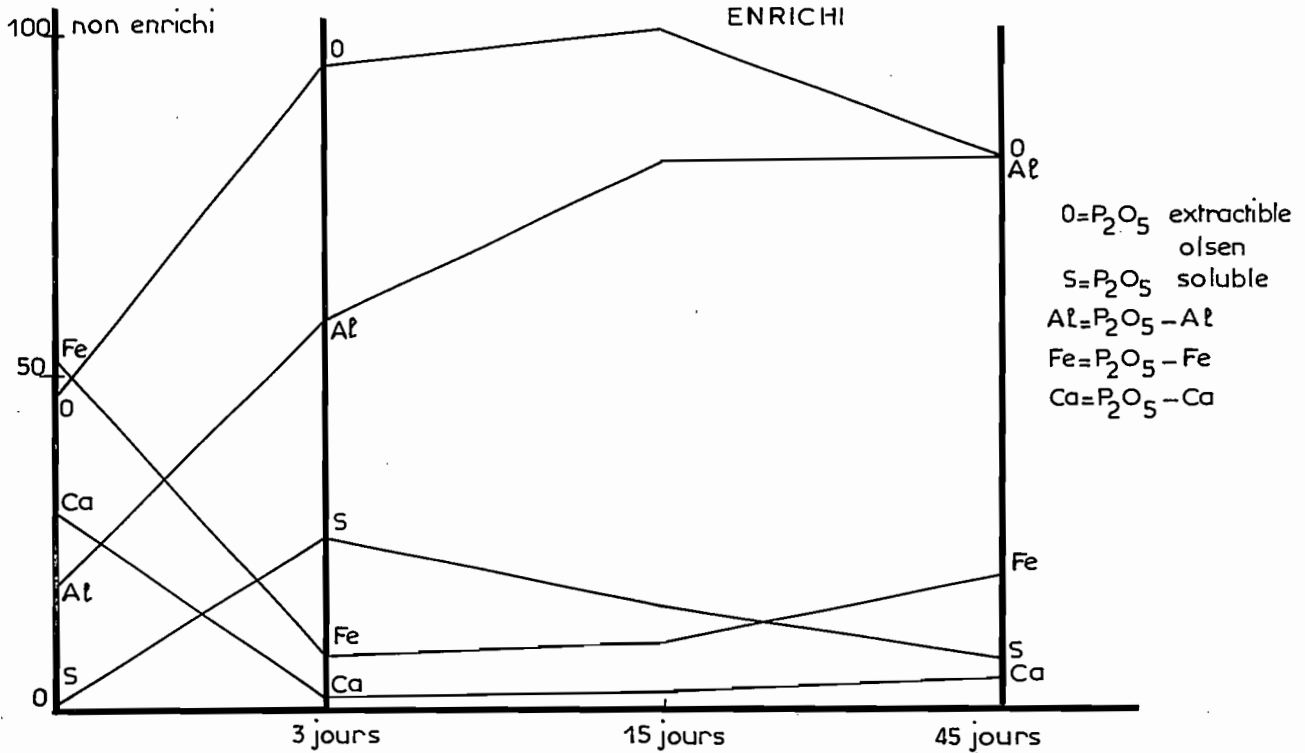


Fig. 8. — Evolution du phosphore avec le temps. Doses 0 et 1000 p.p.m. P_2O_5 .

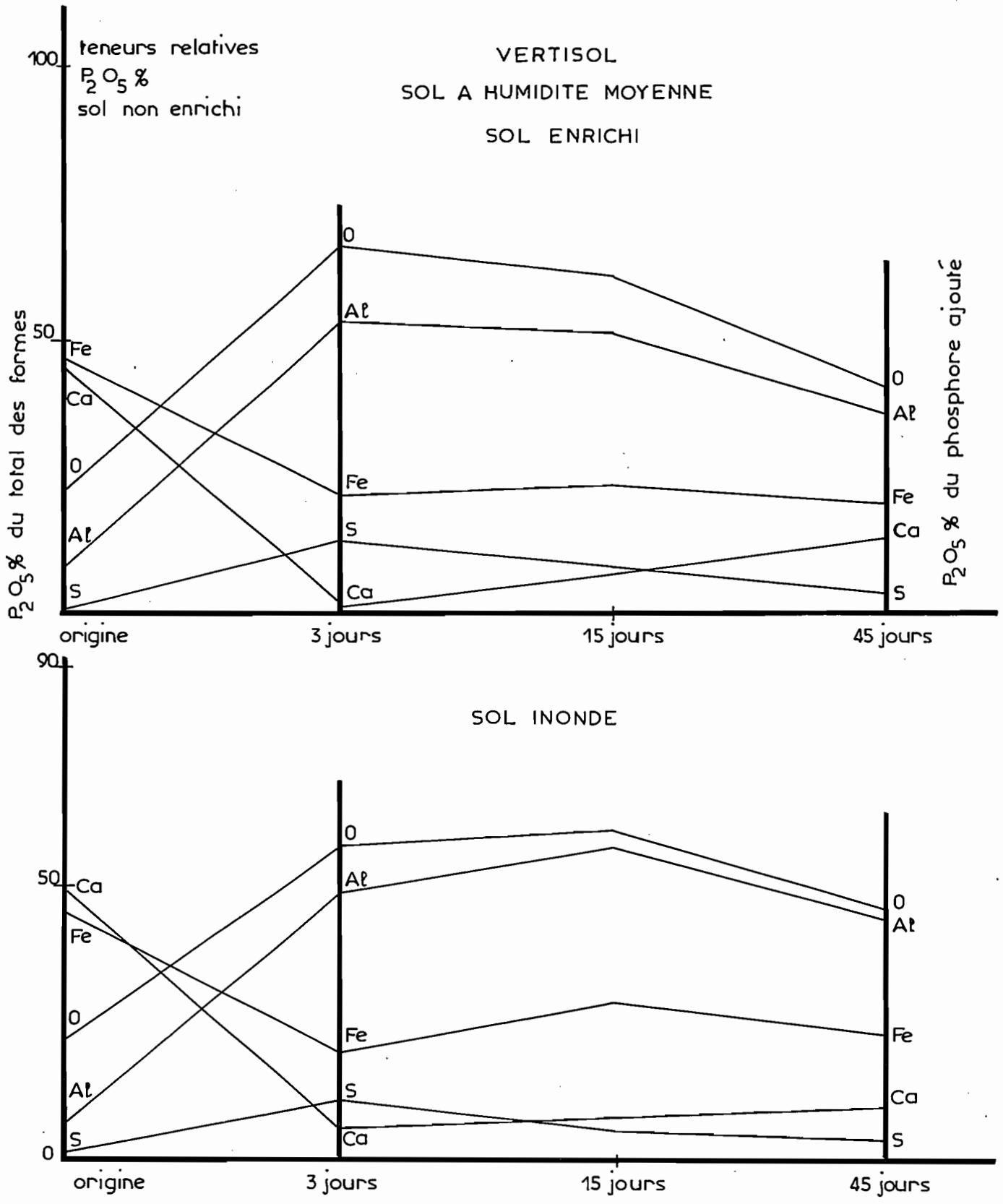


Fig. 9. — Evolution du phosphore avec le temps. Doses 0 et 300 p.p.m. P₂O₅.

VERTISOL
HUMIDITE MOYENNE (SOL EXONDE)
SOL ENRICHI

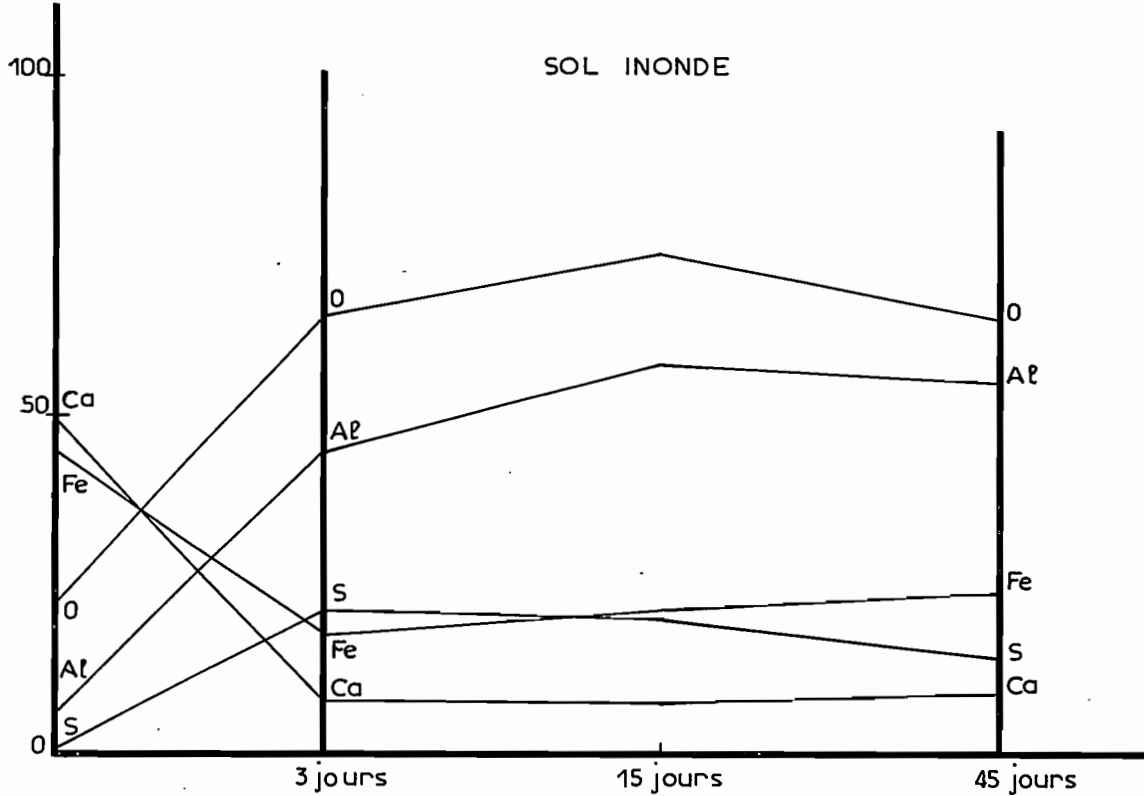
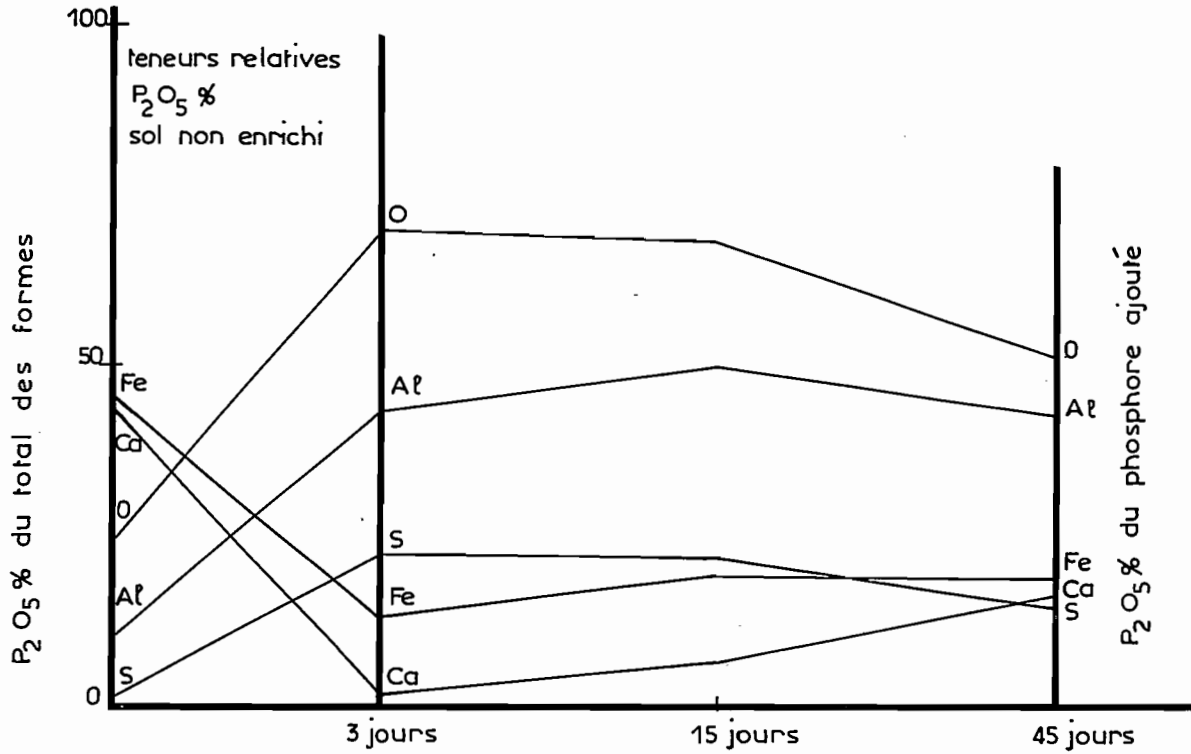


Fig. 10. — Evolution du phosphore avec le temps. Doses 0 et 1 000 p.p.m. P₂O₅.

QUATRIÈME PARTIE

APPLICATION DE LA TECHNIQUE D'ÉTUDE DE FIXATION A DIVERS TYPES DE SOLS

La technique précédente a été appliquée à un certain nombre de sols d'Afrique Tropicale et de Madagascar.

L'étude de la fixation a porté uniquement sur la période courte de trois jours ; dans un premier stade, les six doses de P_2O_5 de 100 à 1 000 ppm ont été appliquées pour contrôler la linéarité de fixation, puis les essais ont porté seulement sur une dose de 250 ppm de P_2O_5 , ce qui permet d'avoir une méthode rapide d'appréciation de la fixation.

1 - ÉTUDE DES SOLS FERRALLITIQUES DE MADAGASCAR ET D'AFRIQUE

(tabl. 11, 12, 13, 13 bis, 14, 15, 16, 17 et fig. 11, 12, 13, 14, 15, 16).

L'étude complète a été effectuée sur des échantillons de sols ferrallitiques prélevés à moyenne profondeur.

Il s'agit de trois échantillons d'un sol de Madagascar (Mad₁, Mad₂, Mad₃) de profondeur croissante, et d'un échantillon de sol du Cameroun prélevé à moyenne profondeur (Hy 82).

En ce qui concerne les échantillons de Madagascar, on part de sols moyennement pourvus en P_2O_5 , le phosphore extractible est voisin du P Al avec peut-être une petite proportion de P Ca.

Le phosphore lié au fer est en proportions considérables par rapport aux autres formes, mais intervient certainement très peu dans le phosphore extractible OLSEN.

L'enrichissement du sol par différentes doses de P_2O_5 provoque un accroissement du P extractible OLSEN et des différentes formes, dont la représentation graphique a un aspect linéaire.

La pente de fixation de P Al est importante, ce qui montre une bonne réactivité du phosphore avec l'aluminium.

La pente de P Fe, par contre, est relativement faible, la pente de P Ca est nulle ; *quant au phosphore soluble, il est pratiquement nul en valeur absolue quelle que soit la dose de P_2O_5 appliquée*, de très faibles quantités apparaissent cependant en profondeur pour les doses de 600 à 1 000 ppm.

Le P extractible OLSEN présente une pente importante parallèle à celle de P Al.

Il y a donc, dès le contact avec le sol, une absorption complète de phosphore soluble, mais sous une forme relativement extractible.

En ce qui concerne le sol du Cameroun (Hy 82), la richesse en P_2O_5 au départ est plus faible, mais avec cependant une dominance considérable en valeur relative du phosphore lié au fer P Fe.

L'enrichissement avec P_2O_5 soluble provoque une augmentation à peu près linéaire des différentes formes. Comme dans les sols précédents, le phosphore soluble est totalement absorbé et il est nul, sauf pour les fortes doses où il est très faible.

P Ca est très faible également et augmente très peu avec la dose.

P Al est peu élevé aux faibles doses et n'augmente réellement que pour les fortes doses, néanmoins, la fixation globale est nettement plus faible que dans les sols précédents.

*Fixation du phosphore sur des sols ferrallitiques diversement enrichis
Formes de fixation après trois jours de contact.*

Tableau 11

Sol de Madagascar - horizon de profondeur - ppm P ₂ O ₅							
Mad 1							
P ₂ O ₅ ajouté	0	100	200	400	600	800	1 000
P ₂ O ₅ assimilable	112	172	226	350	498	588	738
P ₂ O ₅ soluble	0	0	0	0	0	0	4,58
P ₂ O ₅ Al	64,4	96,2	139	233	332	453	577
P ₂ O ₅ Fe	450	474	480	561	625	668	712
P ₂ O ₅ Ca	105	93	36	43	107	73	61

Tableau 12

Sol de Madagascar - horizon de profondeur - ppm P ₂ O ₅							
Mad 2							
P ₂ O ₅ ajouté	0	100	200	400	600	800	1 000
P ₂ O ₅ assimilable	307	366	420	516	618	758	852
P ₂ O ₅ soluble	0	0	0	0	2,28	3,43	4,58
P ₂ O ₅ Al	190	242	279	380	480	604	700
P ₂ O ₅ Fe	1 310	1 305	1 325	1 339	1 048	1 415	1 490
P ₂ O ₅ Ca	250	245	240	251	212	283	283

Tableau 13

Sol de Madagascar - horizon de profondeur - ppm P ₂ O ₅							
Mad 3							
P ₂ O ₅ ajouté	0	100	200	400	600	800	1 000
P ₂ O ₅ assimilable	390	450	560	712	840	992	1 128
P ₂ O ₅ soluble	0	0	1	3	8	12	11
P ₂ O ₅ Al	349	404	501	648	763	920	1 094
P ₂ O ₅ Fe	1 062	1 104	1 104	1 159	1 159	1 214	1 242
P ₂ O ₅ Ca	278	253	276	271	278	266	289

Tableau 13 bis

Sol de Madagascar - horizon de surface - ppm P ₂ O ₅		
Sakaï 11		
P ₂ O ₅ ajouté	0	250
P ₂ O ₅ OLSEN	22	165
P ₂ O ₅ soluble	0	2,3
P ₂ O ₅ Al	16	133,4
P ₂ O ₅ Fe	82,8	89,7
P ₂ O ₅ Ca	13,8	18,4

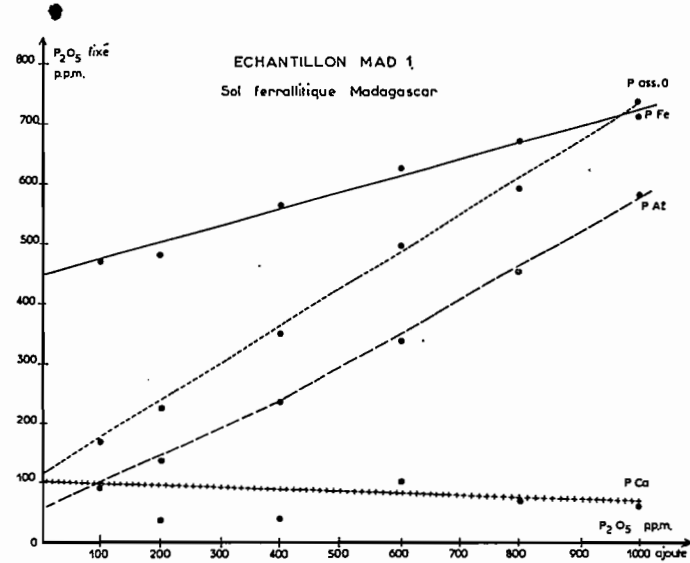


Fig. 11. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté.

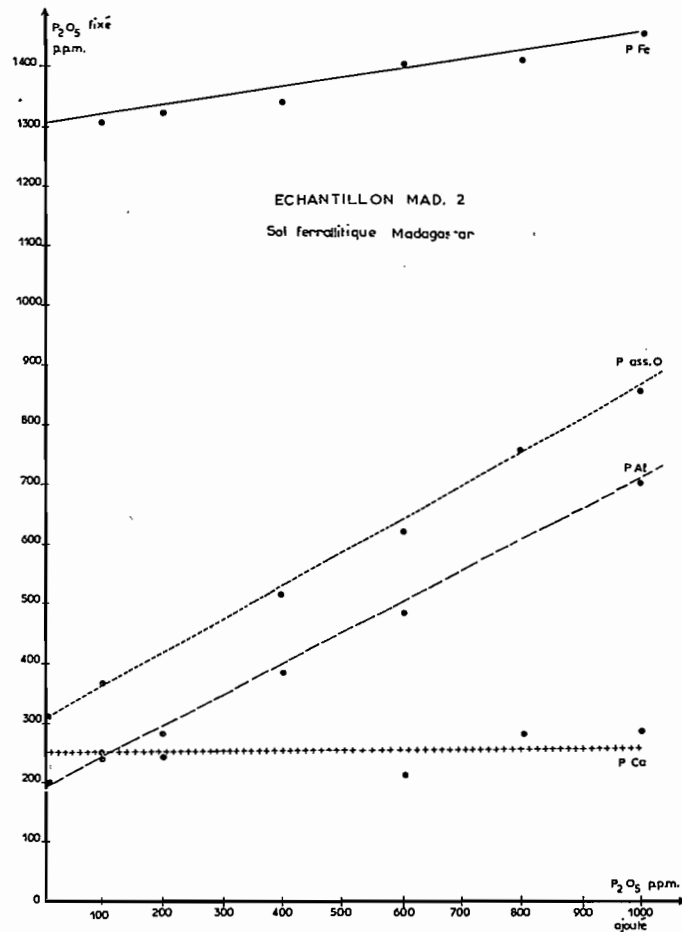


Fig. 12. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté.

P Fe, en revanche, présente une pente de fixation beaucoup plus forte que dans les sols précédents ; la fixation est intense.

P extractible OLSEN est relativement peu élevé et parallèle à P Al.

En conclusion, dans le sol du Cameroun, la fixation à court terme sous forme de phosphore lié au fer est nettement plus forte que dans le sol de Madagascar, l'augmentation de P Fe correspond à une nette diminution de P Al et du P extractible OLSEN.

Essais sur d'autres sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire et du Dahomey.

Il s'agit là aussi d'échantillons prélevés à moyenne profondeur :

- God 3 Dahomey ;
- Ya 15 Côte d'Ivoire.

L'essai a porté sur une dose unique de 250 ppm de P_2O_5 soluble appliquée pendant trois jours.

En supposant la fixation linéaire, un graphique simplifié a été dessiné.

Dans ces deux sols, le P_2O_5 soluble est également nul, P Ca est très faible ; par contre dans l'échantillon

God 3 (Dahomey), P extractible OLSEN et P Al sont relativement élevés, alors que P Fe est relativement faible ; dans l'échantillon Ya 15 (Côte d'Ivoire), c'est l'inverse, la fixation sous forme de P Fe est relativement élevée, alors que P Al et P extractible OLSEN sont relativement faibles.

Regroupement des résultats et interprétation

Pour les divers échantillons :

- Madagascar (Mad 1 - Mad 2 - Mad - 3) ;
- Cameroun (Hy 82) ;
- Côte d'Ivoire (Ya 15) ;
- Dahomey (God 3).

un calcul des pourcentages relatifs de fixation a été fait pour la dose 250 ppm, ainsi que le calcul des pourcentages par rapport à la somme des formes du phosphore dans les sols non enrichis. Ces divers pourcentages ont été portés sur graphique.

Sur tous ces graphiques, l'évolution du phosphore soluble est nulle, et l'évolution du phosphore lié au calcium est très faible (le P Ca croît très légèrement dans le sol à l'équilibre).

En ce qui concerne P Al et P Fe, on peut séparer les sols en deux groupes, d'une part Madagascar et

Formes de fixation du phosphore sur des sols ferrallitiques diversement enrichis Fixation après trois jours.

Tableau 14

Sol du Cameroun - horizon de profondeur - ppm P_2O_5							
Hy 82							
P_2O_5 ajouté	0	100	200	400	600	800	1 000
P_2O_5 assimilable OLSEN ..	16	32	60	136	230	324	420
P_2O_5 soluble	0	0	0	0	0	2,29	4,58
P_2O_5 Al	4,6	11,5	27,5	70,9	139,6	206,1	279,3
P_2O_5 Fe	101	150	210	310	390	462	542
P_2O_5 Ca	7	13,8	25,2	34,4	23	27,4	55

Tableau 15

Sol du Dahomey - horizon de profondeur - ppm P_2O_5			Sol de Côte d'Ivoire - horizon de profondeur - ppm P_2O_5		
God 3			Yapo 15		
P_2O_5 ajouté	0	250	P_2O_5 ajouté	0	250
P_2O_5 assimilable OLSEN ..	10	168	P_2O_5 assimilable	6	95
P_2O_5 soluble	0	11,5	P_2O_5 soluble	0	1,15
P_2O_5 Al	9,2	147,2	P_2O_5 Al	2,3	57,5
P_2O_5 Fe	41,4	108,4	P_2O_5 Fe	18,4	154
P_2O_5 Ca	4,6	9,2	P_2O_5 Ca	2,3	6,9

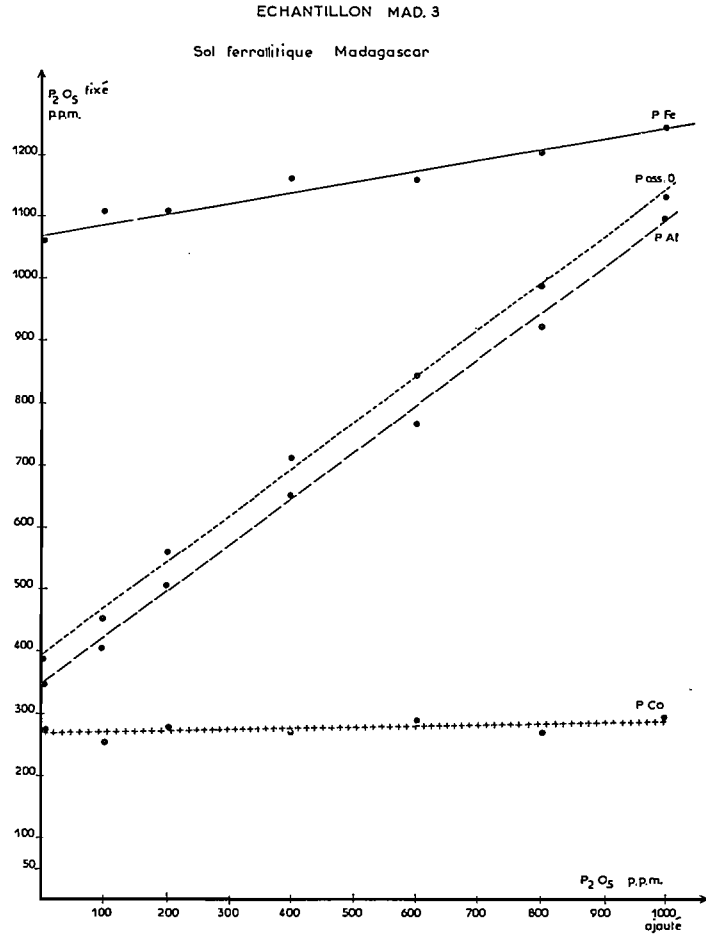


Fig. 13. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté.

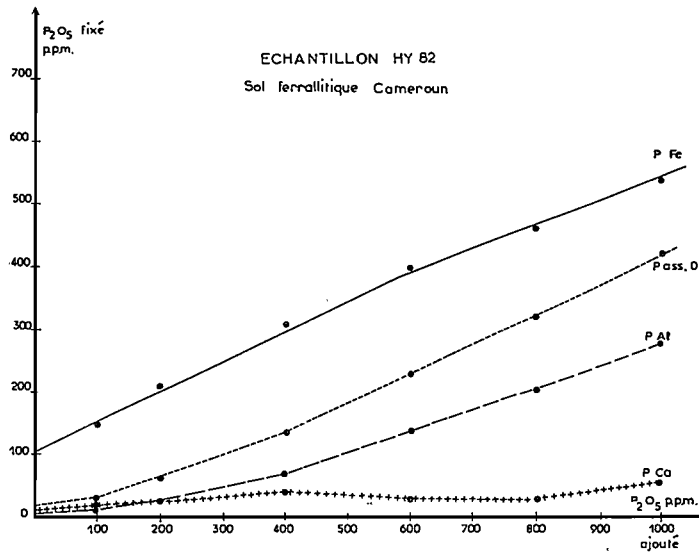


Fig. 14. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté.

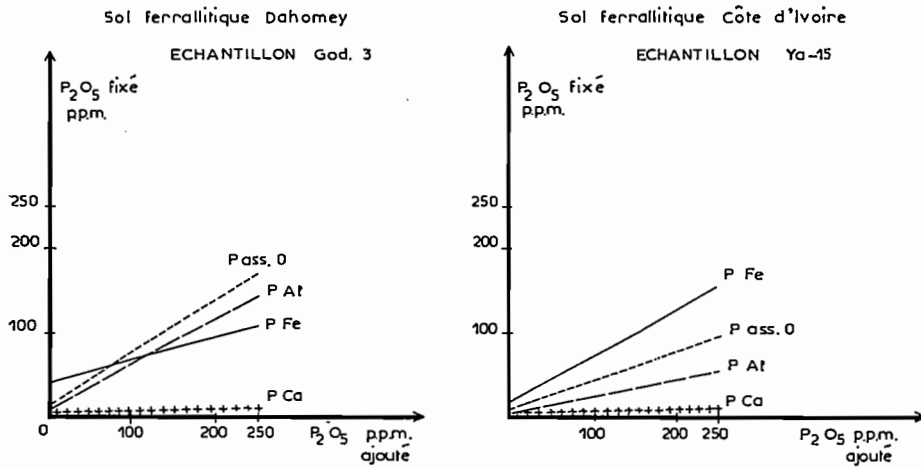


Fig. 15. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté.

SOLS HYDROMORPHES

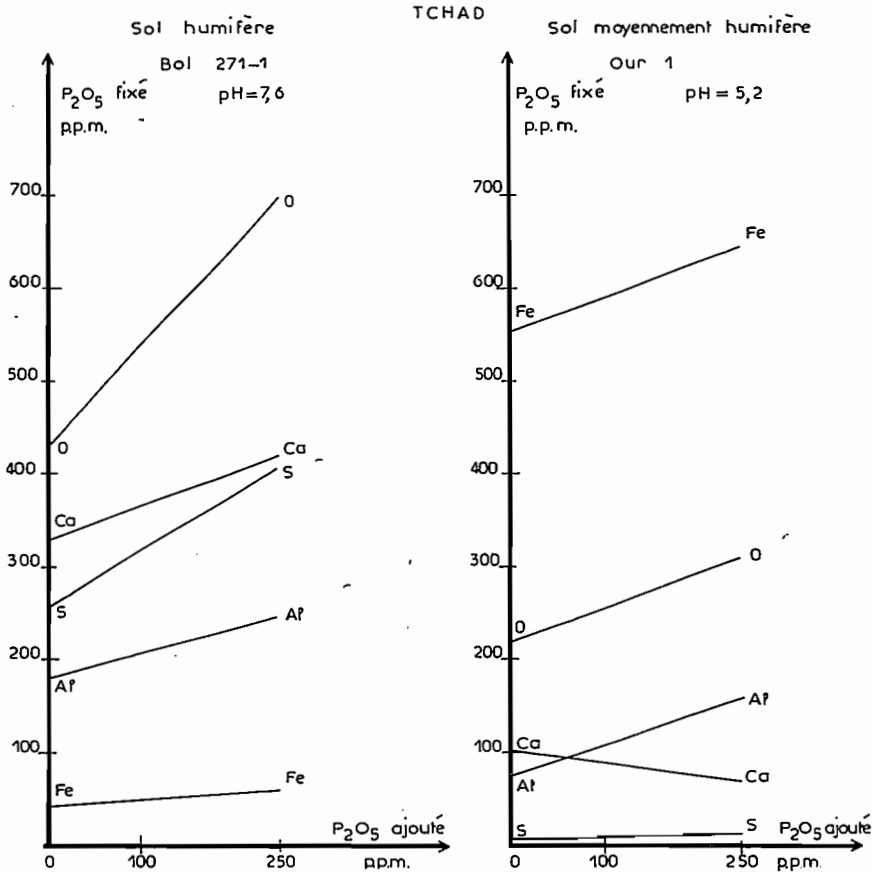


Fig. 19. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté. (*)

(*) L'emplacement de la figure 19 a été modifié pour les besoins de la mise en page.

Dahomey (God 3) où le phosphore ajouté montre une faible réactivité avec le fer après trois jours et une très forte réactivité avec l'aluminium, et, d'autre part, Côte d'Ivoire (Ya 15) et Cameroun (Hy 82) où la réactivité après trois jours avec le fer est élevée et la réactivité avec l'aluminium plus faible. Ces différences influent sur la valeur du P extractible OLSEN qui est de 60 % à 80 % dans le premier cas, et seulement de 35 % à 40 % dans le second cas ; ces différences peuvent avoir une grande importance sur l'utilisation d'un engrais phosphaté en première année d'application.

L'évolution vers l'équilibre à long terme a sensiblement la même allure dans les deux cas, c'est-à-dire que l'on observe un fort accroissement du phosphore lié au fer, et une forte diminution du phosphore lié à Al.

Le phosphore extractible OLSEN diminue parallèlement à P Al, et à l'équilibre final il se situe entre 15 à 20 %, ce qui est bas, alors que P Fe a des valeurs comprises entre 70 % à 90 %.

Bien sûr, on ne connaît pas la vitesse de transformation de P Al en P Fe, mais on suppose qu'elle est lente (d'après SHELTON et COLEMAN, le rapport $\frac{P\ Al}{P\ Fe}$

diminue de moitié en trois ans). D'ailleurs, certains essais d'arrière-fumure dans des sols de Madagascar donnent encore des résultats positifs deux ans après l'application.

Il est tout de même fort intéressant de connaître la limite d'évolution du phosphore extractible dans ces sols.

Tous ces sols se situent dans la gamme acide pH # 5 et inférieur, ce qui explique la très faible fixation du phosphore sur le calcium, et a pour autre conséquence la teneur très basse en phosphore soluble.

Le pouvoir de fixation sur les sesquioxydes est maximal dans ces sols ; la très forte réactivité de

Proportions relatives des formes du phosphore à l'équilibre initial et des formes de fixation après trois jours pour un enrichissement de 250 ppm de P₂O₅.

Sols ferrallitiques.

Tableau 16

	Cameroun Hy 82		Dahomey God 3		Côte d'Ivoire Ya 15	
	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée
P ₂ O ₅ ass. OLSEN	14,5	40	18	63	20	35
P ₂ O ₅ soluble	0	0	0	0	0	0
P ₂ O ₅ Al	4,2	27,4	16,5	55	10	22
P ₂ O ₅ Fe	90	44	74	27	77	54
P ₂ O ₅ Ca	6,2	4,8	8,2	1,6	10	1,8

Tableau 17. — *Madagascar.*

	Mad 1		Mad 2		Mad 3		Sak 11	
	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée
P ₂ O ₅ ass. OLSEN	18	62	17,5	54	23	83	19	57
P ₂ O ₅ soluble	0	0,4	0	0,4	0	1	0	1
P ₂ O ₅ Al	11	51	11	51	20	74	14,5	47
P ₂ O ₅ Fe	72	26	75	15	62	18	72	2,8
P ₂ O ₅ Ca	17	0	14,5	0	16,5	0	12,3	2

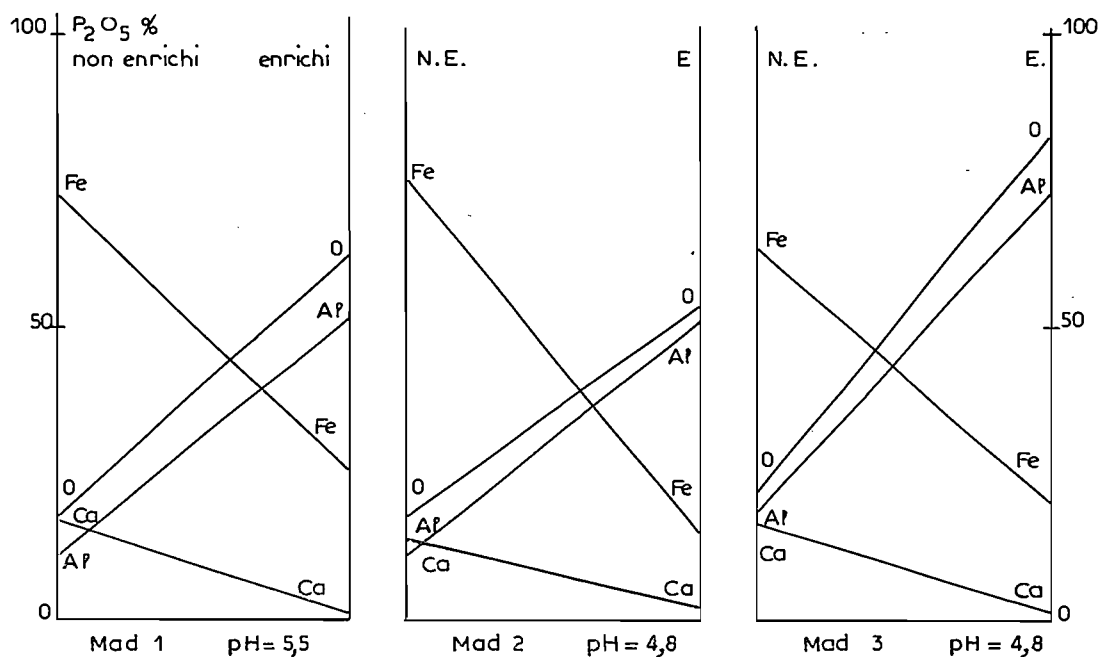
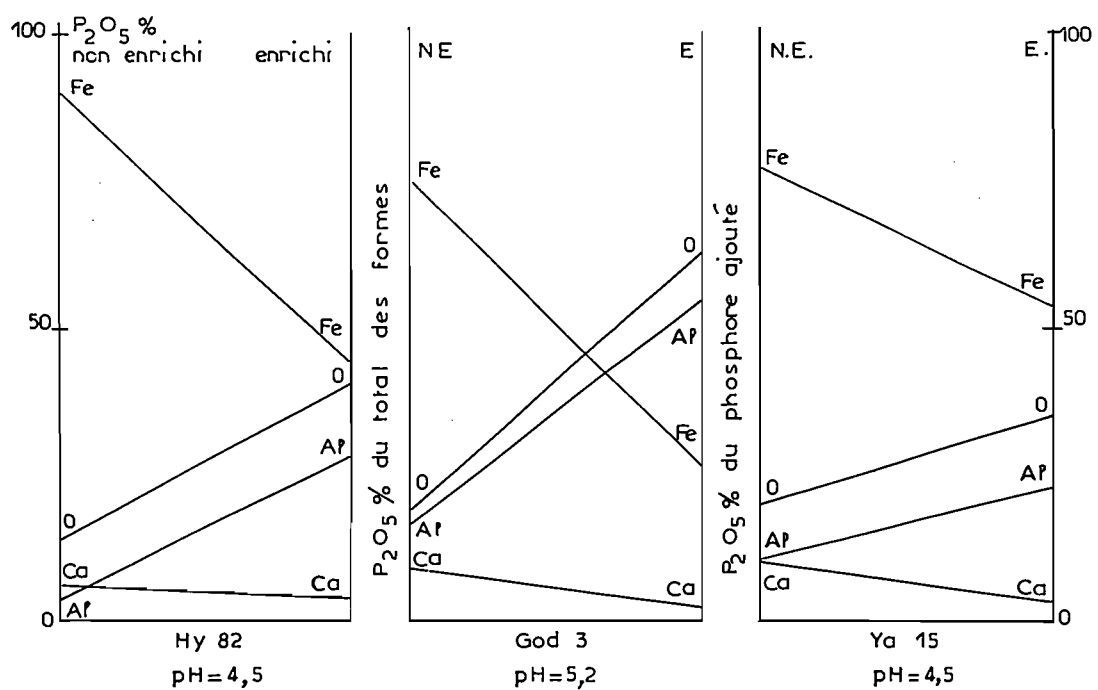


Fig. 16. — Phosphore fixé % du total des formes avec ou sans enrichissement. Sols ferrallitiques.

l'aluminium est bien connue, elle a déjà été démontrée précédemment. En plus de l'aluminium des silicates, certains sols peuvent contenir de l'aluminium amorphe et même de la gibbsite comme les sols de Madagascar qui ont un pouvoir d'absorption élevé pour le phosphore. Mais ce n'est peut-être pas la principale explication des différences de fixation en temps court, car Hy 82 (Cameroun) contient aussi de l'aluminium amorphe.

Tous les sols sont riches en fer libre et particulièrement les sols de Madagascar; cela peut expliquer la forte fixation du phosphore sur le fer à long terme, mais pas la faible fixation à court terme.

D'après des analyses faites par SEGALIN :

— Les échantillons de Madagascar (Mad) contiennent de la kaolinite, de la gibbsite, de l'hématite, ainsi que beaucoup de produits amorphes;

— L'échantillon du Dahomey (God 3) contient de la kaolinite et de l'hématite et des produits amorphes assez abondants;

— L'échantillon du Cameroun (Hy 82) contient kaolinite, illite et goéthite;

— L'échantillon de Côte d'Ivoire contient aussi de la goéthite et peu ou pas d'amorphe.

(La goéthite est un hydroxyde qui domine dans les sols des régions très humides.)

Dans l'introduction, nous avons vu que la réactivité de la goéthite avec le phosphore était bonne, alors que la réactivité de l'hématite était faible; or les sols de Madagascar et du Dahomey contiennent de l'hématite, les autres de la goéthite. C'est peut-être ces différences minéralogiques qui provoquent un équilibre différent de fixation du phosphore à court terme. A long terme, il semble que les oxydes de fer, quelle que soit leur nature, ont un pouvoir de fixation du phosphore nettement plus élevé que l'aluminium.

Un échantillon de sol ferrallitique de Madagascar prélevé en surface (Sakaï 11) donne un graphique de fixation très voisin de celui des échantillons de profondeur, malgré une teneur en matière organique beaucoup plus élevée.

2 - ÉTUDE DE LA FIXATION DU PHOSPHORE DANS LES SOLS DE LA ZONE DE SAVANE DU TCHAD

Sols ferrugineux tropicaux - Sols hydromorphes (Tabl. 18, 19, 20, fig. 17, 18, 19.)

La technique d'étude de fixation du phosphore a été appliquée à des sols de types différents sur l'horizon superficiel (0-15 cm); ils proviennent tous de la cuvette tchadienne. Ces sols sont les suivants :

- Sol sur alluvion, sablo-limoneux,
Sol à alcali lessivé, très érodé : Hardé 1;
- Sol sur alluvion, sablo-limoneux,
Sol ferrugineux tropical lessivé : Ba illi 11;

— Sol rouge sur continental terminal,
Sol ferrugineux tropical lessivé,
sous-végétation naturelle : Kelo 1;

— Sols beiges sur continental terminal,
Sols ferrugineux tropicaux lessivés,
cultures de coton.
Sols de fertilité croissante :

- Bangoul 11
- Begada 21
- Bebed 11
- Begada 11
- Bangoul 21
- Bangoul 31

— Sol hydromorphe humifère du lac Tchad :
Bol 271-1;

— Sol hydromorphe minéral argileux du Logone :
Our 1.

Pour tous les sols, les droites de fixation du phosphore ont été tracées entre 0 et 250 ppm de P_2O_5 ; de même, les pourcentages relatifs des formes avec ou sans enrichissement ont été calculés et représentés graphiquement.

a) Propriétés générales des sols étudiés

Toute la série des sols non hydromorphes possède des propriétés assez homogènes dans l'horizon de surface : ce sont des sols peu argileux et peu humifères; la teneur en matière organique augmente avec la richesse du sol de même que le pH qui varie de 6 à 8.

Les sesquioxydes sont peu abondants en valeur absolue, mais suffisants néanmoins pour pouvoir fixer le phosphore à long terme.

Les sols hydromorphes sont humifères et argileux, ils diffèrent par leur pH, l'un est neutre, l'autre est acide; la richesse en humus du sol de polder neutre est également plus élevée. La teneur en fer libre du sol hydromorphe argileux Our 1 est plus élevée, ce qui explique en partie la fixation à court terme, celle du sol humifère est très basse.

b) Résultats obtenus

Sols non hydromorphes

b₁) Sols pauvres en phosphore

Il est possible de séparer dans une première série les sols pauvres en phosphore de pH inférieur à 7, c'est-à-dire Hardé 1, Ba illi 11, Kelo 1, Bangoul 11, Begada 21, Bebed 11, et dans une deuxième série les sols riches en phosphore et à pH supérieur à 7.

Fixation du phosphore après trois jours pour 250 ppm dans la première série.

Sauf pour Hardé 1 dont le pH est de 5,7 et qui montre une certaine réactivité du fer sur le phosphore, pour tous les autres sols de pH supérieur à 6, la réactivité du fer et du calcium est faible, et la fixation du phosphore sur l'aluminium est importante.

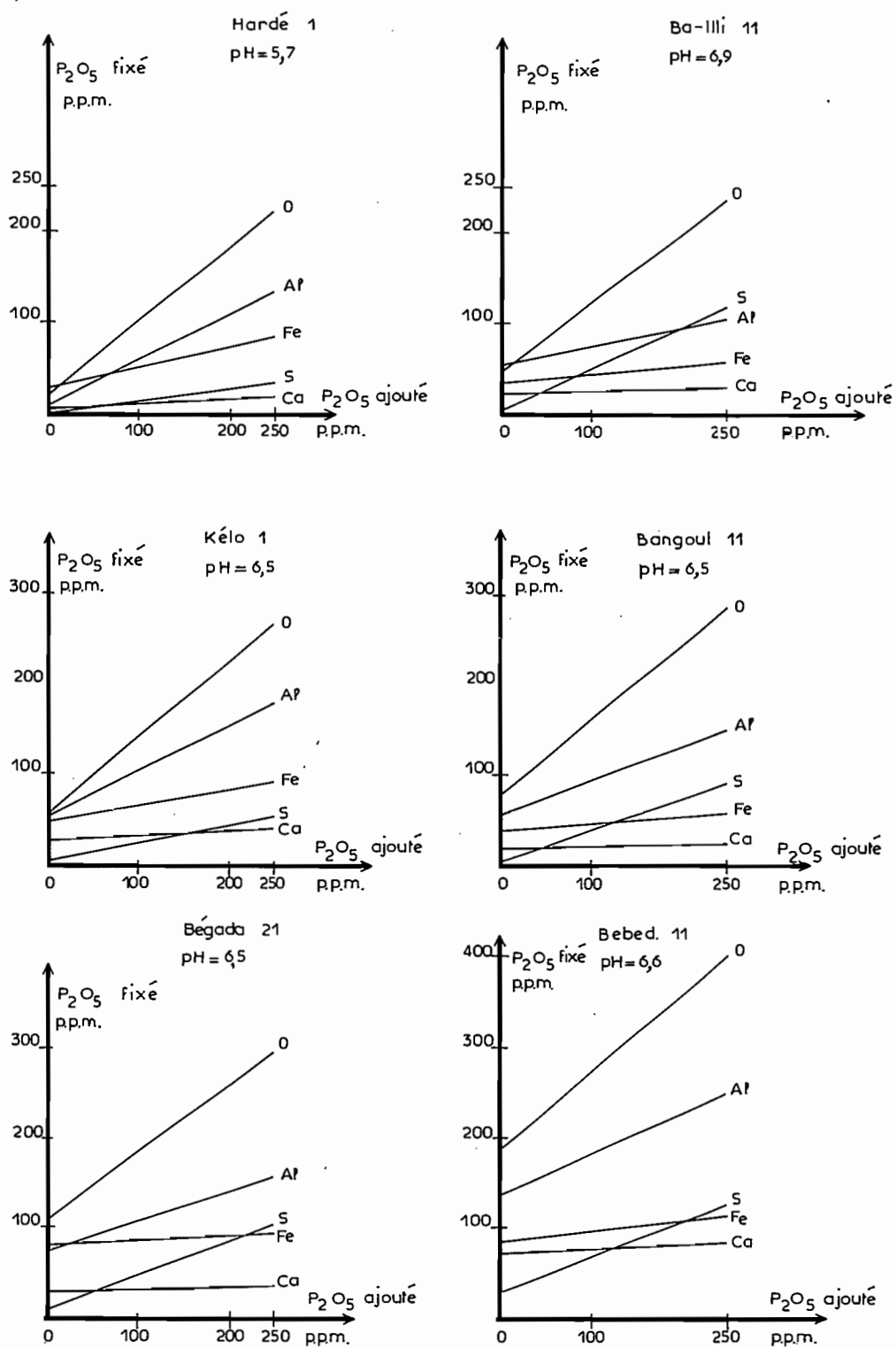


Fig. 17. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté. Sols ferrugineux tropicaux. Tchad.

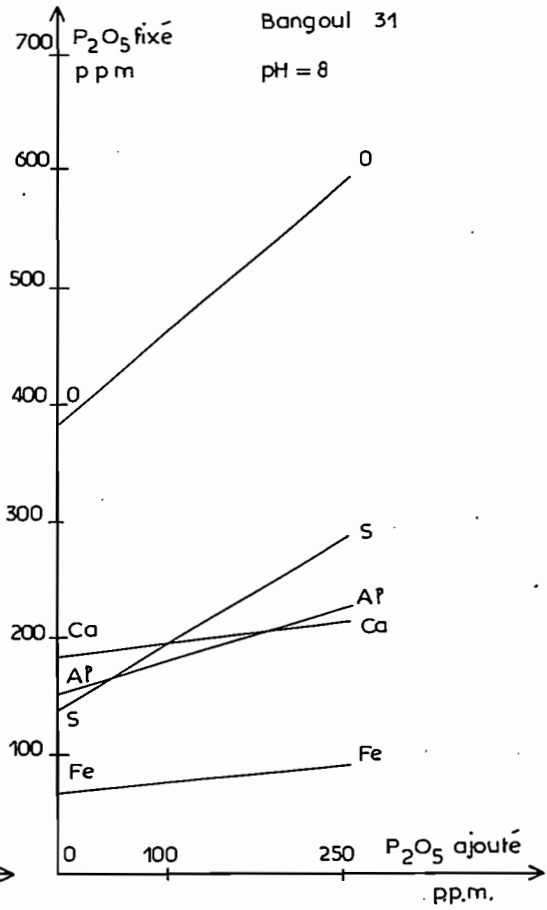
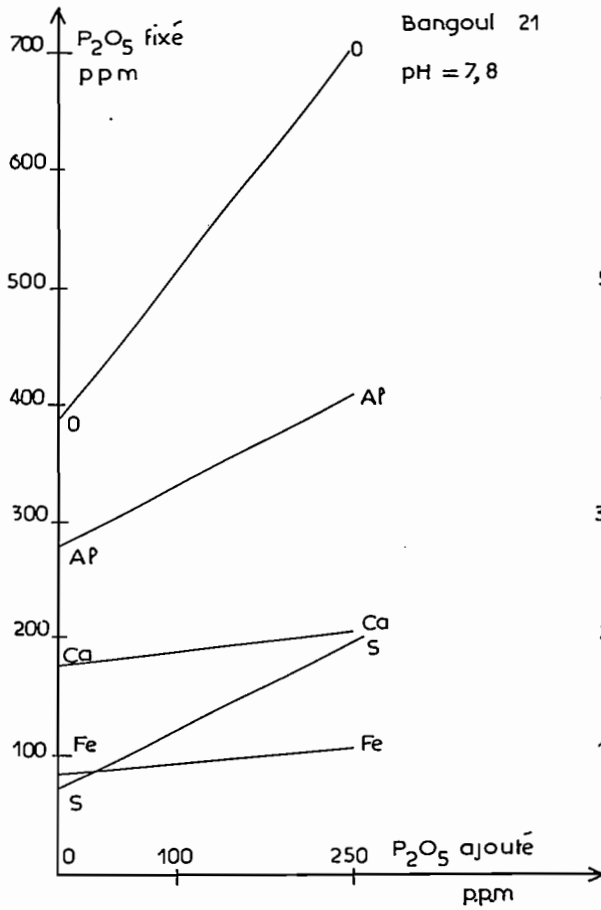
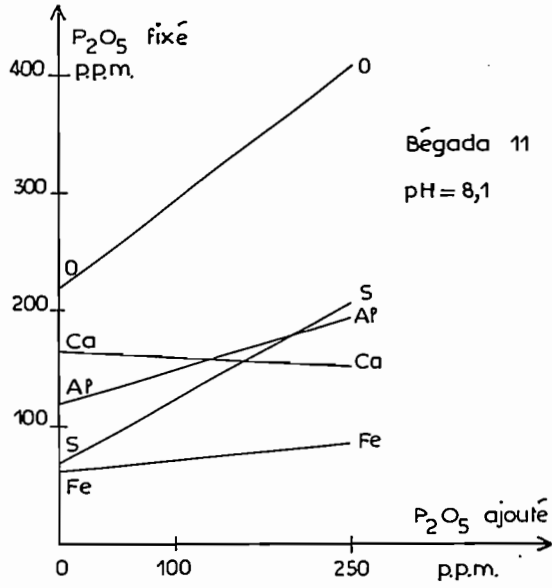


Fig. 18. — Phosphore fixé en % du phosphore ajouté.

Sols ferrugineux tropicaux du Tchad (Horizons de surface)
Formes de fixation après trois jours, pour un enrichissement de 250 ppm P_2O_5 .

Tableau 18. — Sols ferrugineux tropicaux lessivés.

	Hardé 1		Bailli 11		Kelo 1		Bangoul 11	
	0	250	0	250	0	250	0	250
P_2O_5 ajouté	0	250	0	250	0	250	0	250
P_2O_5 ass. OLSEN	20	225	60	235	58	270	80	280
P_2O_5 soluble	0	32,2	9,6	117	6,9	50,6	6,9	92
P_2O_5 Al	9,2	133	66,7	105	50,6	179,4	57,5	151
P_2O_5 Fe	27,6	85	36,8	57	50,6	87	39,1	57
P_2O_5 Ca	11,5	16	23	29	27,6	39	18,4	23

Tableau 19. — Sols ferrugineux tropicaux lessivés.

	Begada 21		Bebed 11		Begada 11		Bangoul 21		Bangoul 31	
	0	250	0	250	0	250	0	250	0	250
P_2O_5 ajouté	0	250	0	250	0	250	0	250	0	250
P_2O_5 ass. OLSEN	108	295	186	405	221	405	392	700	387	600
P_2O_5 soluble	9,2	101	27,6	124,2	69	207	73,6	193,2	142	289
P_2O_5 Al	73,6	161	138	248	119,6	193	280,6	411	151	225
P_2O_5 Fe	78,2	89	82,8	115	64,4	87	80,5	103	69	94
P_2O_5 Ca	29,9	36,8	71,3	78,2	172,5	151	177	202	184	220

Sols hydromorphes humifères du Tchad (surface).
Formes de fixation après trois jours
pour un enrichissement de 250 ppm P_2O_5 .

Tableau 20

	Sol hydromorphe humifère à anmoor calcique Bol 271 1		Sol hydromorphe à gley - acide Our 1	
	0	250	0	250
P_2O_5 ajouté ...	0	250	0	250
P_2O_5 ass. OLSEN	430	700	218	355
P_2O_5 soluble ...	257,6	406	2,3	0
P_2O_5 Al	179,4	243	73,6	156
P_2O_5 Fe	41,4	57	552	644
P_2O_5 Ca	331,2	418	107,9	66,7

Une différence essentielle avec les sols ferrallitiques, que l'on note immédiatement sur les graphiques, est la proportion élevée de P_2O_5 soluble dans les sols enrichis. Cette proportion de phosphore soluble est encore faible dans Hardé 1 dont le pH est de 5,7, elle croît fortement dans Bailli 11 dont le pH est de 7,9 et dans les autres sols dont le pH est de 6,5-6,6.

Un autre fait à noter est que le phosphore extractible OLSEN est nettement supérieur à P Al, dans les sols enrichis il représente à peu près la somme P Al + P soluble.

Dans tous ces sols, P Fe reste supérieur à P Ca en valeur absolue.

SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX

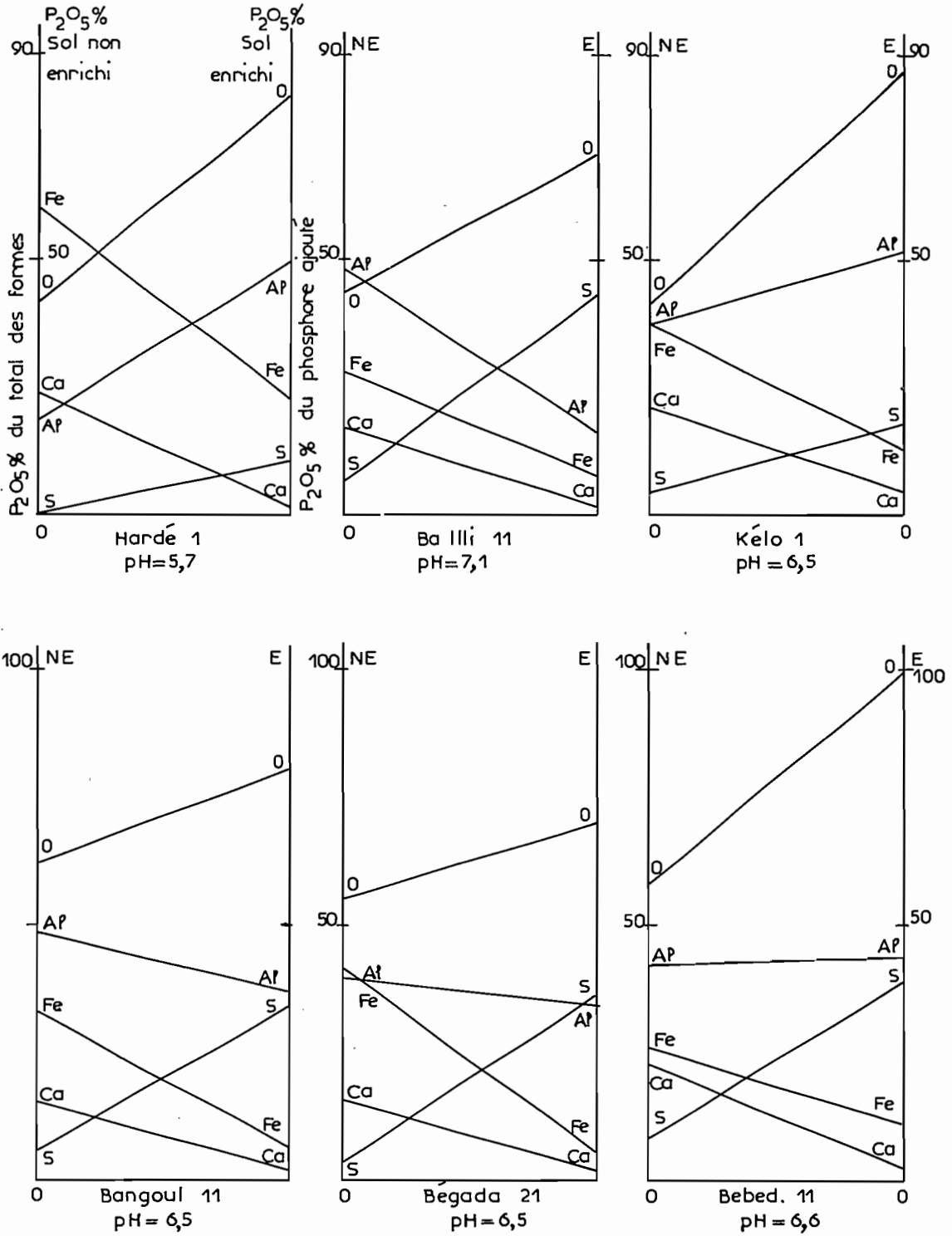
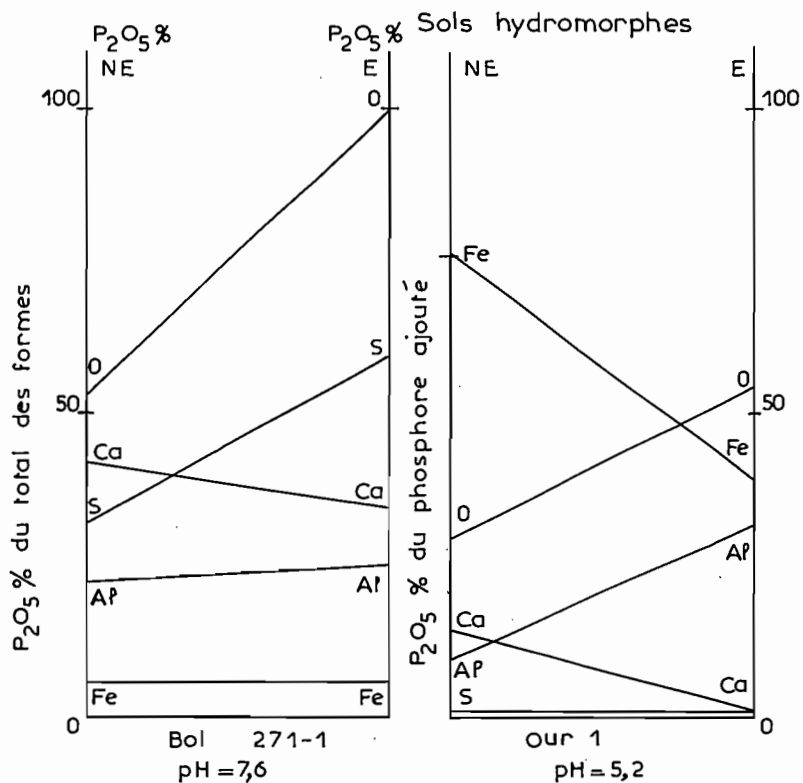
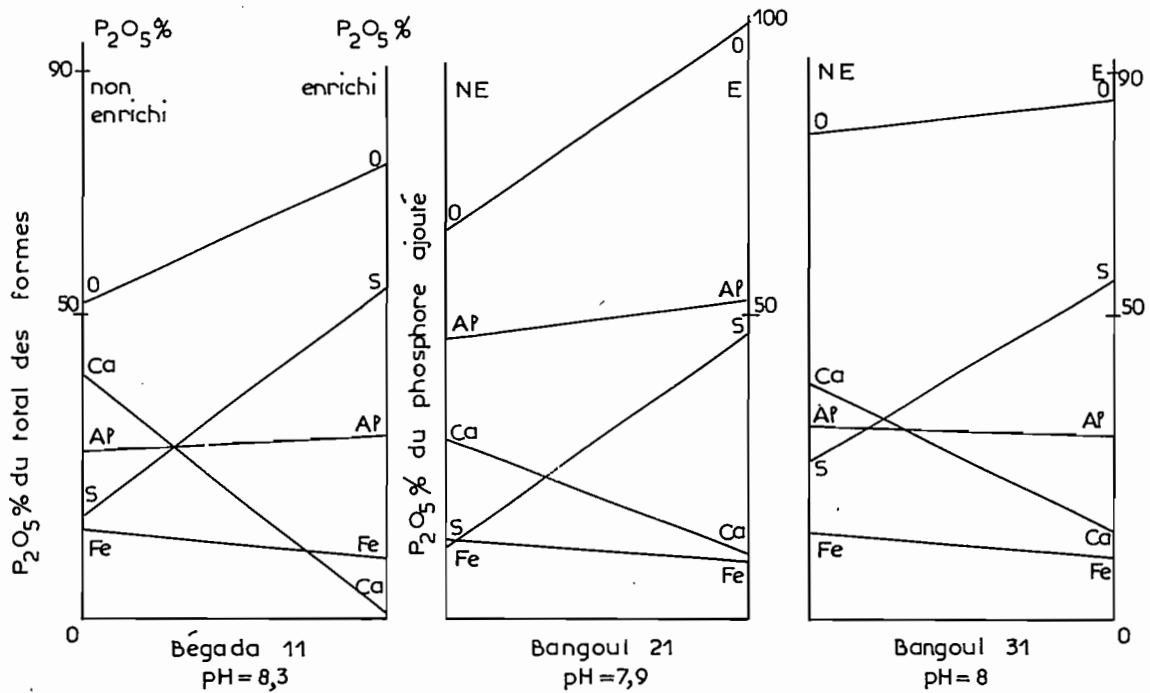


Fig. 20. — Phosphore fixé % du total des formes avec ou sans enrichissement.

Sols ferrugineux tropicaux



Phosphore fixé
% du total des formes,
avec ou sans
enrichissement.

Légende :

- O = P_2O_5 extractible olsen
- S = P_2O_5 soluble
- AP = P_2O_5 AP
- Fe = P_2O_5 Fe
- Ca = P_2O_5 Ca

NE = Sol non enrichi
E = Sol enrichi

Fig. 21. — Phosphore fixé % du total des formes sans enrichissement et avec enrichissement.

b.) Sols relativement riches en phosphore

L'enrichissement par 250 ppm de phosphore soluble provoque une augmentation proportionnelle de phosphore extractif OLSEN. Dans les sols dont le pH est égal ou supérieur à 8, le phosphore soluble croît plus rapidement que le phosphore lié à l'aluminium et le dépasse, atteignant parfois des valeurs très élevées (Begada 11 - Bangoul 31). Dans l'échantillon Bangoul 21, P Al est encore un peu supérieur à P soluble, le pH est légèrement inférieur à 8.

Dans cette série d'échantillons, le phosphore lié au calcium (P Ca), malgré sa faible réactivité, est supérieur au phosphore lié au fer (P Fe).

Il est à noter dans ces sols à pH élevé que la pente du P Al est moins importante que dans les sols acides.

Il est vraisemblable que dans ces sols le P soluble représente une forme de phosphate mono ou bicalcique et le PCa du phosphate tricalcique.

Sols hydromorphes

Dans le sol hydromorphe humifère à pH 7,6 (Bol 271-1), le phénomène précédent s'accroît encore, le phosphore soluble est très élevé, et du même ordre que le phosphore lié au calcium. Il existe donc vraisemblablement un équilibre entre les deux formes; le phosphore lié à l'aluminium est plus faible et le phosphore lié au fer est le plus bas.

Dans le sol hydromorphe acide (Our 1), c'est l'inverse, P soluble est nul, P Al et P Ca sont peu élevés, P Fe est très important et Fe montre une bonne réactivité avec le phosphore.

Dans presque tous les sols précédents, le P extractible OLSEN correspond sensiblement à la somme de P soluble + P Al.

c) Pourcentages relatifs de fixation

Les pourcentages relatifs des différentes formes avec ou sans enrichissement sont beaucoup plus inté-

ressants à considérer que les enrichissements en valeur absolue.

Si l'on compare l'équilibre après trois jours, et l'équilibre à long terme (sol non enrichi), le sol acide Hardé 1 montre une diminution relative importante du P extractible OLSEN, correspondant à une diminution de P Al et P soluble, en équilibre avec une augmentation de P Fe et P Ca.

Dans les sols ferrugineux à pH 6,5, la diminution du P OLSEN est un peu plus faible; elle correspond surtout à une baisse de phosphore soluble, s'accompagnant d'une augmentation de P Fe et P Ca; par contre, P Al est peu variable.

Dans le sol à pH 7, seul P soluble diminue; P Al, P Fe et P Ca augmentent. Dans ce sol, il y a un équilibre entre P soluble et P Al, ainsi que P Fe et P Ca, mais il n'y a pas d'équilibre entre P Al et P Fe.

Dans les sols à pH supérieur à 7 (Begada 11, Bangoul 21, Bangoul 31, Bol 271), les proportions de P Al et P Fe sont identiques dans le sol enrichi et dans le sol non enrichi; ces deux formes n'évoluent pratiquement plus dans les équilibres à long terme.

Par contre, la diminution de P soluble correspond à l'augmentation de P Ca. Il y a seulement un équilibre P soluble et P lié au calcium (insoluble).

P Al et aussi P Fe demeurent assimilables.

Dans ces sols, la diminution de P extractible OLSEN est parfois faible: dans Bangoul 21, elle diminue de 100 % à 65 %; dans Bangoul 31, elle diminue seulement de 85 % à 80 %.

Dans le sol hydromorphe acide argileux, on retrouve l'équilibre des sols acides. Il y a forte diminution de P Al correspondant à une forte augmentation de P Fe et une faible augmentation de P Ca. Le phosphore extractible OLSEN est seulement de 55 % après trois jours, et de 30 % à l'équilibre.

La rétrogradation est donc intense dans ces sols, et le phosphore soluble est nul dès l'équilibre initial, les hydroxydes de fer s'y trouvent donc sous une forme très réactive.

Proportions relatives des formes du phosphore à l'équilibre initial et des formes de fixation après trois jours.

Tableau 21

	Solonetz solodisé		Sol ferrugineux à pseudogley		Sol faiblement ferrallitique	
	Hardé 1		Ba illi 11		Kelo 1	
	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée
P ₂ O ₅ ass. OLSEN	42	82	44	70	42	85
P ₂ O ₅ soluble	0	12,5	6,6	42	5	17,5
P ₂ O ₅ Al	19	50	48	16,5	37	52
P ₂ O ₅ Fe	59	23	27	8	37	14,5
P ₂ O ₅ Ca	23	1,8	17	2,4	20,5	5

Tableau 22. —

Sols ferrugineux tropicaux lessivés						
	Bangoul 11		Begada 21		Bebed 11	
	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée
P ₂ O ₅ ass. OLSEN	63	80	56	70	58	100
P ₂ O ₅ soluble	5,7	34	4,9	36	8,7	39
P ₂ O ₅ Al	48	37	39	35	43	44
P ₂ O ₅ Fe	33	7	41	5,5	25,5	12,5
P ₂ O ₅ Ca	15	1,8	15,5	2,6	22	2,8

Tableau 23. —

Sols ferrugineux tropicaux lessivés						
	Bégada 11		Bangoul 21		Bangoul 31	
	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée
P ₂ O ₅ ass. OLSEN	52	74	64	100	80	85
P ₂ O ₅ soluble	16	54	12	47	26	56
P ₂ O ₅ Al	28	30	46	53	32	30
P ₂ O ₅ Fe	15	9	13,5	9	14	10
P ₂ O ₅ Ca	40	0	29	10	38	14

Tableau 24. —

<i>Sols hydromorphes</i>				
	Bol 271-1		Our 1	
	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée	P ₂ O ₅ % du total initial	P ₂ O ₅ % de la quantité ajoutée
P ₂ O ₅ ass. OLSEN	53	100	30	55
P ₂ O ₅ soluble	32	59	0	0
P ₂ O ₅ Al	22	25	10	33
P ₂ O ₅ Fe	5,1	6	76	37
P ₂ O ₅ Ca	41	35	13,5	0

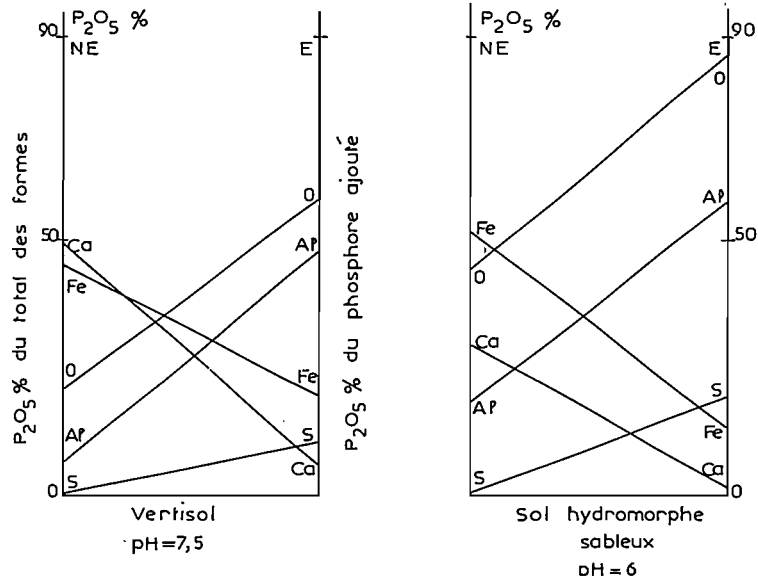


Fig. 22. — Phosphore fixé % du total des formes avec ou sans enrichissement. Vertisol et sol hydromorphe du Tchad.

Sol ferrallitique
(Madagascar)

Horizon de surface
Sakai 11

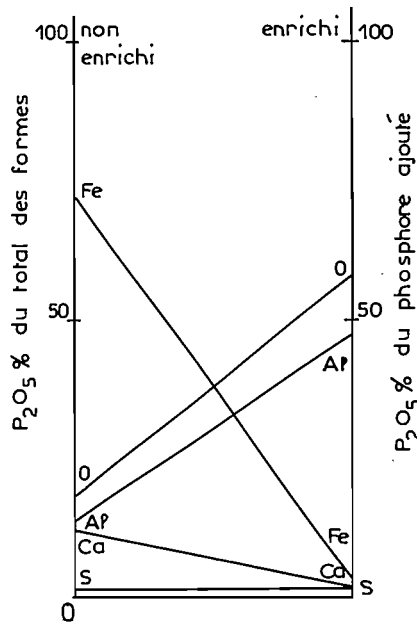


Fig. 23. — Phosphore fixé % du total des formes avec ou sans enrichissement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail traite de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux riches en sesquioxydes ; il tient largement compte des travaux effectués sur les sols latériques du sud des Etats-Unis, ou de certaines régions d'Afrique du Sud et tend à appliquer des techniques analogues aux sols d'Afrique Tropicale et de Madagascar.

L'expérimentation consiste à enrichir des échantillons de sol par du phosphore soluble et, après dessiccation ménagée, à appliquer un certain nombre de tests chimiques : fractionnement des formes du phosphore par la méthode CHANG et JACKSON, application d'un test de solubilité dite méthode OLSEN modifiée ($\text{CO}_2\text{NaH } 0,5 \text{ N} + \text{FNH}_4 \text{ } 0,5 \text{ N} + \text{NaOH q.s. pH } 8,5$).

La fixation du phosphore est étudiée après trois jours de contact avec le sol, et dans certains cas après quinze jours et quarante-cinq jours de contact.

Les divers fractionnements chimiques sont appliqués également au sol non enrichi.

Les résultats montrent que l'accroissement des différentes formes en fonction du phosphore soluble ajouté a une allure sensiblement linéaire, que l'équilibre des différentes formes dépend de la nature du sol et est relativement indépendant de la quantité de phosphore ajoutée pour une dose inférieure à mille ppm.

Les essais d'évolution en quarante-cinq jours montrent que les différentes formes varient peu durant cette période à part le phosphore soluble qui diminue assez nettement dans certains cas, et le phosphore extractible OLSEN qui montre parfois une amorce de décroissance avec le temps.

Donc, la fixation du phosphore après trois jours peut être considérée comme assez représentative de la réaction d'un engrais phosphaté dans le sol au cours de la fumure annuelle.

En ce qui concerne l'évolution à long terme du phosphore ajouté, l'idée essentielle de ce travail est que, en raison de la relative indépendance de la répartition des formes de fixation, en fonction de la dose ajoutée, l'équilibre des différentes formes du phosphore ainsi que le pourcentage du phosphore extractible OLSEN rapporté à la somme des formes, dans le sol non enrichi, représentent la limite vers laquelle tend l'évolution des différentes formes dans le cas d'un enrichissement du sol avec des doses moyennes.

Il s'agit sans doute là d'une approximation, mais les conclusions s'appuient sur les travaux effectués aux Etats-Unis, et ont l'avantage de préconiser une technique rapide d'appréciation de l'évolution du phosphore dans le sol qui nécessite autrement plusieurs années d'expérimentation.

Plusieurs catégories de sols ont pu être distinguées en fonction de leur pH :

a) Les sols très fortement acides à pH inférieur à 5 :

- ce sont soit des sols ferrallitiques ;
- soit des sols hydromorphes.

Tous ces sols ont pour caractéristique commune l'absence de phosphore soluble même après l'enrichissement à court terme.

La réactivité du phosphore avec l'aluminium est moyenne à bonne à court terme ; le phosphore lié à l'aluminium diminue fortement dans le sol non enrichi, c'est-à-dire à l'équilibre à long terme.

La réactivité du phosphore avec le calcium est nulle à court terme, le phosphore lié au calcium augmente très peu à long terme.

En ce qui concerne la réactivité avec le fer à court terme, deux cas peuvent se présenter :

— Dans certains sols, cette réactivité est faible, la teneur en P Fe est faible et la teneur en P Al est élevée. Il semble que ce phénomène ne se produit que dans les sols où le fer se trouve sous forme d'hématite (sols de Madagascar et du Dahomey).

— Dans le deuxième cas, la réactivité à court terme avec le fer est élevée, P Fe est élevé et P Al est faible ; les sols concernés sont des sols des régions humides riches en goethite, ou le sol hydromorphe acide (sols de Côte d'Ivoire, du Cameroun, sol hydromorphe du Tchad). Cette forte fixation à court terme sur le fer qui concurrence l'adsorption par Al, diminue la valeur du phosphore extractible OLSEN (ou encore assimilable).

Le P extractible OLSEN est plus élevé dans les sols contenant de l'hématite que dans les sols riches en goethite. La teneur peut passer de 90 % à 40 %, ce qui constitue un rétrogradation considérable du phosphore dans le second cas.

La rétrogradation à long terme du phosphore par fixation sur le fer est très forte dans tous les cas, le P Fe atteint 60 à 80 %, alors que le P extractible OLSEN est inférieur à 20 %.

b) Sols moyennement acides à pH voisin de 6

Ce sont deux sols sur alluvions du Tchad ; un sol hydromorphe sableux, un sol lessivé à alcalis.

Dans les deux cas, le phosphore soluble augmente légèrement dans le sol enrichi après trois jours de contact. Il semble cependant que ce phosphore soluble décroît assez vite et il est pratiquement nul dans le sol non enrichi.

— Le phosphore lié à l'aluminium est élevé dans le sol enrichi à court terme, et diminue fortement dans le sol non enrichi.

— Le phosphore lié au fer suit une évolution inverse, assez faible dans le sol enrichi à court terme, il augmente fortement à l'équilibre à long terme. Il y a vraisemblablement transformation de P Al en P Fe avec diminution du rapport $\frac{\text{P Al}}{\text{P Fe}}$ avec le temps.

— Le phosphore lié au calcium est à peu près nul dans le sol enrichi à court terme, il augmente assez nettement dans le sol non enrichi.

— Le phosphore extractible OLSEN est élevé dans le sol enrichi à court terme (90 %), il diminue jusqu'à 40 % dans le sol non enrichi ; son évolution est parallèle à P Al, mais il comprend vraisemblablement P soluble et P lié au calcium qui doit être relativement extractible à ce pH.

c) Sols faiblement acides à neutres : pH 6,5 à 7.

Ce sont essentiellement des sols ferrugineux tropicaux de la cuvette tchadienne.

— Le phosphore soluble est élevé (20 % à 40 %) après enrichissement à court terme ; il diminue dans le sol non enrichi, mais conserve une certaine valeur (entre 5 % et 10 %).

— La réactivité du phosphore lié à l'aluminium est moyenne dans le sol enrichi ; un fait très important est que le P Al ne diminue pas dans le sol non enrichi, il a tendance à augmenter.

— La réactivité du fer et du calcium est faible dans le sol enrichi ; l'augmentation de P Fe et P Ca n'est pas très importante dans le sol non enrichi et se fait surtout aux dépens de P soluble.

— Le P extractible OLSEN semble correspondre aux formes P soluble, P Al, P Ca ; il est élevé dans le sol enrichi, il diminue moyennement dans le sol non enrichi, mais peut conserver une valeur voisine de 50 % ; cette diminution correspond à l'augmentation de P Fe.

d) Sols à pH compris entre 7 et 8 (sols ferrugineux tropicaux et hydromorphes).

Dans ces sols, le phosphore soluble est très élevé, jusqu'à 50 % dans le sol enrichi, il dépasse toutes les autres formes ; dans le sol non enrichi, il peut conserver une valeur élevée de 15 à 30 %.

— La réactivité du phosphore avec Al reste moyenne, la proportion de P Al ne varie pas dans le sol non enrichi.

— La réactivité avec le fer est faible, P Fe n'augmente pas dans le sol non enrichi (c'est le seul cas où l'on observe cette absence d'évolution de P Fe).

— Par contre, le calcium montre parfois une certaine réactivité dans le sol enrichi ; elle augmente assez nettement dans le sol non enrichi. Cette augmentation de P Ca correspond à la diminution de P soluble ; il y a vraisemblablement équilibre entre les deux formes (transformation de phosphate mono et bicalcique en phosphate tricalcique).

P Fe et P Al n'interviennent pratiquement pas dans ces équilibres à long terme.

— Le phosphore extractible OLSEN très élevé dans le sol enrichi, s'abaisse jusqu'à une proportion moyenne de 60 % dans le sol non enrichi, il semble toujours correspondre à la somme P soluble + P Al, mais il peut comprendre aussi P Fe, alors que P Ca est insoluble.

Vertisols

Dans la catégorie des sols de pH 7 à 7,5, un cas particulier est celui des vertisols, où la réactivité à long terme avec le fer et le calcium est importante ; la teneur en phosphore soluble est peu élevée, et le phosphore extractible OLSEN varie de 60 % dans le sol enrichi à 20 % dans le sol non enrichi. La rétrogradation du phosphore dans les vertisols est donc importante et peut correspondre à une certaine richesse relative en fer libre, ainsi qu'en calcium.

Conséquences pratiques de ces résultats

Il y aurait lieu de confirmer ces résultats par des essais en vase de végétation par exemple, mais si l'on tient compte des résultats déjà obtenus ailleurs, on sait que le phosphore adsorbé sur les ions Al constitue une forme importante pour l'alimentation des plantes ; dans les sols ferrallitiques acides, elle est pratiquement la seule forme utilisable ; la rétrogradation du phosphore dans ces sols correspond au passage du phosphore vers la forme liée au fer. Dans les autres sols, on constate des phénomènes analogues mais plus ou moins accentués, il est donc très utile de connaître l'évolution de la forme P Al dans les sols. *Une forme très importante à considérer est la forme dite soluble*, ce phosphore soluble est surtout en équilibre avec les ions calcium, et diminue avec le temps par formation de phosphate tricalcique, cette diminution pouvant être assez rapide.

Donc, pour une même teneur en phosphore extractible OLSEN, il y a lieu de considérer la proportion de phosphore soluble ; en effet ce phosphore soluble a une action rapide sur les plantes, en début de végétation, alors que le phosphore adsorbé sur Al est utilisable mais d'une façon plus progressive. Il est extrêmement intéressant de déterminer si le P soluble peut varier fortement ou faiblement dans les équilibres à long terme.

Par ailleurs, le phosphore lié au calcium représente certainement une forme beaucoup moins utilisable et le phosphore lié au fer est une forme de rétrogradation très importante ; parfois cette rétrogradation est rapide (sols acides riches en goéthite), parfois elle est lente mais importante (sols acides riches en hématite), parfois elle est nulle (sols neutres ou alcalins). De toutes façons il est utile de déterminer la rétrogradation maximale à long terme sous forme de phosphore lié au fer qui donne une idée de la perte par insolubilisation des engrais phosphatés apportés au sol.

Projet de recherches

Le présent travail doit être poursuivi pour mieux définir les causes réelles de fixation du phosphore, en particulier l'action des hydroxydes et du calcium, et pour préciser l'influence réelle de la matière organique sur ces processus.

Enfin, des essais doivent être réalisés pour tenter de modifier l'intensité de la fixation en agissant soit sur le pH, soit sur la teneur en matière organique. Une dernière expérimentation pourrait être faite sur des petits pots de culture d'après la méthode CHAMINADE, en utilisant le Raygrass comme plante test et en prolongeant l'essai sur une centaine de jours.

MÉTHODE D'ÉTUDE RAPIDE DE LA FIXATION DU PHOSPHORE SUR LE SOL

Fixation à court terme et à long terme

- Peser 10 g de sol séché à l'air (tamis 2 mm);
- Placer dans une boîte à couvercle, ajouter en une fois 10 ml d'une solution à 250 ppm de P_2O_5 (phosphate monopotassique ou monocalcique), mélanger;
- Laisser en contact trois jours;
- Sécher à 50° sous une lampe à infrarouge (épiradiateur);
- Broyer finement le sol sec.

a) Effectuer le fractionnement des formes du phosphore d'après la méthode CHANG et JACKSON :

P soluble, P Al, P Fe, P Ca.

b) Doser le phosphore extractible par la méthode OLSEN modifiée :

FNH_4 0,5 N + CO_2NaH 0,5 N — pH 8,5.

c) Faire les mêmes analyses sur le sol non enrichi par P_2O_5 soluble.

— Calculer les pourcentages relatifs d'augmenta-

tion de chaque forme par rapport au phosphore soluble ajouté dans le sol enrichi, et les pourcentages relatifs de chaque forme par rapport à la somme des formes dans le sol non enrichi.

Réactifs

Solution mère de P_2O_5 à 1000 ppm : 1,9171 g PO_4H_2K dans 1 litre d'eau.

Solution à 250 ppm : diluer 4 fois.

Fixation à moyen terme

Pour étudier l'évolution à moyen terme, on peut partir de 50 g de terre enrichie par 25 ml de solution à 500 ppm de P_2O_5 (soit 250 γ par g de terre) et maintenir le sol à humidité moyenne pendant 90 jours dans une boîte de pétri.

— Faire des prélèvements à 30 jours, 60 jours, 90 jours ;

— Effectuer les mêmes analyses que précédemment.

Analyse des sols ferrallitiques.

	Cameroun	Dahomey	Côte d'Ivoire	Madagascar		
	Hy 82	God 3	Ya 15	Mad 1	Mad 2	Mad 3
Argile	34	45	38,5	12,5	40	31
Limon fin	7	2	29,5	12	14	17
Limon grossier	7	3	13,5	19,5	22,5	23
Sable fin	15,5	10	10,5	20,5	14	19
Sable grossier	34,2	38	6	32,7	5,9	5,4
M.O. %	0,2	0,3	0,3	0,7	0,2	0,1
C %	0,10	0,2	0,15	0,41	0,13	0,04
N % ₀₀	0,2	0,27	0,24	0,112	0,07	0,048
C/N	4,8	7,4	6,3	36,6	18,1	8,3
pH eau	4,5	5,2	4,5	5,5	4,8	4,8
pH KCl	4,5	4,6	4,4	5,9	4,6	4,2
B.E. m. é. p. 100 g						
Ca	0,15	1,17	0,44	0	0	0,88
Mg	0,28	0,73	0,15	0	0,15	0
K	0,09	0,17	0,11	0,05	0,15	0,22
Na	0,06	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04
T	5,78	6,07	6,5	6,4	10,9	12,9
P_2O_5 total % ₀₀	0,89	0,58	0,35	5,16	4,1	1,10

	Cameroun	Dahomey	Côte d'Ivoire	Madagascar		
	Hy 82	God 3	Ya 15	Mad 1	Mad 2	Mad 3
Analyse totale triacide :						
Perte au feu	9,55	6,25	8,8	15,6	12,15	10,4
Résidu %	23,9	52,6	25,5	3,15	0,4	0,15
Si O ₂ %	24,4	18,6	28,7	10	18,95	27,6
Al ₂ O ₃ %	21,8	16,6	22,7	28	23,8	23,4
Fe ₂ O ₃ %	17,8	3,6	9,6	29,4	30,8	26
Ti O ₂ %	1	0,9	1,6	7,8	7,4	6
Si O ₂ /Al ₂ O ₃	1,89	1,9	2,15	0,6	1,35	2
Si O ₂ /R ₂ O ₃	1,24	1,66	1,69	0,36	0,7	1,17
Fe ₂ O ₃ libre	13,7	3,24	7	15,9	13,2	9,4
Fe ₂ O ₃ total	16,6	3,5	8	28,6	30	24,6

Analyse des sols du Tchad.

<i>Sols ferrugineux tropicaux</i>						
	Hardé 1	Ba illi 11	Kelo 1	Bangoul 11	Begada 21	Bebed 11
M.O. %	0,7	0,9	1,7	0,8	1	1,4
C %	0,42	0,51	1,01	0,48	0,58	0,83
N ‰	0,280	0,413	0,64	0,306	0,32	0,574
pH eau	5,7	7,1	6,5	6,5	6,5	6,6
pH KCl	4,5	6,4	5,9	6	6	6,1
Fe ₂ O ₃ libre	0,73	0,20	1,3	0,85	0,60	0,6

<i>Sols ferrugineux tropicaux</i>				<i>Sols hydromorphes humifères</i>	
	Begada 11	Bangoul 21	Bangoul 31	Bol 271-1	Our 1
M.O. %	1,8	1,7	2	4,2	2,9
C %	1,04	1,01	1,15	2,42	1,66
N ‰	0,494	0,706	0,720	2,24	1,37
pH eau	8,3	7,9	8	7,6	5,2
pH KCl	8	7,4	7,4	7,1	3,9
Fe ₂ O ₃ libre	0,50	1,07	0,90	0,15	2,1

<i>Sol hydromorphe minéral</i>		<i>Vertisol</i>	
	Dila 31	Bedem 11	
M.O. %	0,8	0,7	
C %	0,48	0,4	
N ‰	0,37	0,34	
pH eau	6	8,1	
pH KCl	4,8	7	
Fe ₂ O ₃ libre	0,28	1,33	

RÉSUMÉ

Divers types de sols tropicaux sont enrichis avec un phosphate soluble et sont ensuite analysés par une technique de phosphore assimilable (OLSEN modifiée) et par la technique de fractionnement (CHANG et JACKSON). La comparaison des sols enrichis et des sols non enrichis permet de prévoir l'importance de la fixation du phosphore à court terme et de son évolution à long terme.

BIBLIOGRAPHIE

- ALAN, WILD, 1950. — The retention of phosphate by soil. *J. Soil Sci.*, 1, 2, 221.
- ALBAN L.A., S. VACHAROTOYAN et T.L. JACKSON, 1964. — Phosphorus availability in reddish brown lateritic soils. *Agron. J.*, 56, 6, 555-558.
- ARVIEU J.C., 1967. — D.E.S. Faculté de Nice.
- BOISCHOT P., 1968. — Réaction des phosphates solubles en sols calcaires. *Bull. A.F.E.S.*, 4, 29-35.
- BRIOUX, 1923. — *Ann. agr.*, 185.
- CHANG et JACKSON, 1957. — *Soil Sci.*, 84, 2.
- CHANG S.C. et S.R. JUO, 1963. — Available phosphorus in relation to forms of phosphate in soils. *Soil Sci.*, 95, 2, 91-95.
- CHANG S.C. et W.K. CHU, 1961. — The fate of soluble phosphate applied to soils. *J. Soil Sci.*, Oxford, 12, 2, 286-293.
- DABIN B., 1963. — Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. Les formes du phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. *Cahiers O.R.S.T.O.M. Pédologie*, 1, 3, 27-42.
- DABIN B., 1964. — Les formes du phosphore dans quelques sols des Antilles. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Pédologie*, 1, 2, 5-12.
- DABIN B. — Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Pédologie*, 1965, 3, 4, 335-366. 1^{re} partie. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Pédologie*, 1967, 5, 3, 257-286, 3^e partie.
- DABIN B., 1967. — Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux. *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive*, nov. 1967, publ. I.R.A.T., 1, 99-115.
- DEMOLON, BOISCHOT, Mille LAJON, 1951. — *C.R. Ac. Sc.*, 233, 509.
- DUTIL P. et J.C. DUMON, 1967. — *Bull. Ass. Fr. Et. Sol.*, 6, 27.
- JACKSON M.L., 1958. — Soil chemical analysis, 498 p. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs.
- LEVESQUE M. et M. SCHNITZER, 1967. — Organo-metallic interactions in soils. 6. Preparation and properties of fulvic acid metal phosphates. *Soil Sci.*, 103, 3, 183-190.
- LLOYD JENKINS W., 1966. — The relation between labile soil phosphorus and the aluminium and iron bound phosphorus in tropical soils. *Plt and Soil*, 24, 3, 407-421.
- MORENO E.C., W.L. LINDSAY et G. OSBORN, 1960. — Reactions of dicalcium phosphate dehydrate in soils. *Soil Sci.*, 90, 1, 58-68.
- SAUNDER D.A., 1956. — *Soil Sci.*, 82, 6, 457.
- SEGALEN P., 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Pédologie*, 6, 1, 105.
- SHELTON J.E. et N.T. COLEMAN, 1968. — Fractionnement du phosphore inorganique et relations avec les valeurs résiduelles de fortes applications de phosphore, sur des sols à forte capacité de fixation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30, 1, 91-94.
- SRIVASTAVA O.P. et A.N. PATHAK, 1968. — Available phosphorus in relation to forms of soil phosphorus. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 16, 103-109.
- TAYLOR A.W., E.L. GURNEY et W.L. LINDSAY, 1960. — An evaluation of some iron and aluminium phosphates as source of phosphates for plants. *Soil Sci.*, 1, 90, 25-31.
- Van DIEST A., 1963. — Soil test correlation studies on New-Jersey soils. Comparison of seven method measuring labile inorganic soil phosphorus. *Soil Sci.*, 96, 4, 261-266.

SUMMARY

Various types of tropical soils are enriched with a soluble phosphate and are later analyzed with the assimilable phosphate technique (OLSEN'S modified technique) and with the fractioning technique (CHANG

and JACKSON).

Comparing enriched soils and non enriched soils permits to anticipate the importance of short-term phosphorus fixation and of its long-term evolution.

RESUMEN

Diversos tipos de suelos tropicales se han enriquecido con un fosfato soluble y se han analizado a continuación mediante una técnica de fósforo asimilable (OLSEN modificada) y por la técnica de fraccionamiento (CHANG y JACKSON).

La comparación de los suelos enriquecidos con suelos no enriquecidos permite prever la importancia de la fijación del fósforo a corto plazo y de su evolución a largo plazo.