

ASSOCIATION INTERNATIONALE DES FABRICANTS DE SUPERPHOSPHATE
COMITÉ AGRONOMIQUE
PARIS

"Phosphore et Agriculture" Bull. Doc. N° 57, Juin 1971

**ÉTUDES SUR LA FERTILISATION PHOSPHATÉE DES SOLS
EN AFRIQUE TROPICALE ET A MADAGASCAR**

S. BOUYER (ORSTOM, France)*

La plupart des sols tropicaux d'Afrique et de Madagascar sont pauvres en phosphore ; l'analyse donne des teneurs en élément total, assimilable ou labile souvent très faibles ; il en résulte que l'alimentation phosphorique des plantes qui y sont cultivées est déficiente et qu'elle constitue l'un des facteurs limitants des rendements.

Les expérimentations effectuées par l'IRAT ont mis en évidence l'efficacité de la fumure phosphatée, qui est parfois spectaculaire ; mais il peut arriver qu'elle soit moins nette, en particulier lorsque le sol a un pouvoir fixateur élevé et qu'il est pauvre en matière organique.

C'est pourquoi il a été nécessaire d'effectuer, en plus des études expérimentales, des recherches sur la dynamique du phosphore dans les sols tropicaux, pour essayer de trouver des solutions satisfaisantes aux problèmes variés que pose la fertilisation phosphatée dans ces régions.

1 — RECHERCHES SUR LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX

Les études analytiques de base ont montré que la teneur en phosphore total présente des variations considérables, en fonction de l'origine géologique du sol, de sa teneur en matière organique et de son degré d'épuisement :

Types de sols	P total en p.p.m.
Ferrugineux tropicaux du Sénégal (Dior) :	20- 120
» » » Niger (sols dunaires) :	50- 140
» » de Haute-Volta (sur granite) :	40- 80
Ferrallitiques de R.C.A. (sur quartzite) :	150- 300
» » Madagascar (sur gneiss) :	400- 500
» » La Réunion (sur basalte) :	1 500-3 000
Hydromorphes de la Vallée du Sénégal (Hollaldé) :	200- 300
» humiques à gley de Madagascar (sols de rizière) :	1 000-1 500

* Synthèse établie d'après les travaux de M. COUEY, J.F. POULAIN et R. TOURTE (IRAT-Sénégal), C. PIERI (IRAT-Mali), C. DUMONT et B. DUPONT de DINECHIN (IRAT-Haute-Volta), J. NABOS (IRAT-Niger) en collaboration avec PIRHO, R. WERTS (IRAT-Dahomey), J.P. COLONNA (IRAT-R.C.A.), P. ROCHE et J. VELY (IRAM), J. FRITZ (IRAT-Réunion) et les travaux du Laboratoire de Fertilité des Sols de l'IRAT, à Nogent-sur-Marne.

O. R. S. T. O. M.

- 3 MARS 1972

Collection de Référence

M 43

n° 52 69 Pedo.

Dans les sols ferrugineux tropicaux étudiés, la teneur est extrêmement faible. Elle peut atteindre des valeurs élevées dans les terrains formés sur roches volcaniques, ainsi que dans les sols riches en matière organique, comme les sols à rizières de Madagascar, par exemple.

Le fractionnement du phosphore du sol par la méthode de Chang et Jackson a montré que, dans les terrains qui ont été soumis à une longue évolution pédologique (ferrugineux tropicaux et ferrallitiques par exemple), la fraction incluse dans un revêtement ferrugineux est très importante (jusqu'à 80 % du phosphore minéral) ; or cette fraction est pratiquement inaccessible aux racines des plantes, et un moyen d'améliorer la fertilité du sol peut consister à la récupérer par apport de matière organique. D'autre part, parmi les formes minérales non incluses, c'est généralement le phosphate de fer qui est prédominant ; or, c'est une forme que l'on considère comme relativement peu labile (1) (2).

1. 1 — Teneur en phosphore de la solution du sol : le facteur intensité

Dans les conditions naturelles d'un terrain en place, la solution du sol est alimentée par le stock de phosphore qui existe sous forme labile ; il s'établit un équilibre de répartition entre phase solide et phase liquide. Or, dans les terrains à pouvoir fixateur élevé que nous avons étudiés, cet équilibre est tel que la concentration du phosphore en solution est extrêmement faible (parfois moins de 0,01 mg/litre) ; il en résulte que les plantes n'ont à leur disposition immédiate qu'une quantité très faible de cet élément ; une autre conséquence, qui constitue l'une des principales difficultés de ces études, est l'impossibilité de déterminer, de façon suffisamment précise, ces teneurs par les méthodes colorimétriques classiques ; nous avons ainsi été conduits à mettre au point une méthode très sensible, basée sur une concentration de la solution à l'aide d'une résine anionique et sur la constance de son activité spécifique $^{32}\text{P}/^{31}\text{P}$, lorsqu'on lui ajoute du phosphore radioactif (3).

1. 2 — Teneur en phosphore labile : le facteur quantité (ou capacité)

La détermination du phosphore labile par dilution isotopique de ^{32}P dans le phosphore du sol semble plus rationnelle que les méthodes d'extraction chimique, car on obtient ainsi la fraction de cet élément qui est susceptible de passer dans la phase liquide, donc d'être absorbée par les racines.

Les études que nous avons effectuées sur la valeur E (en laboratoire) et sur la valeur L (en serre) de divers sols tropicaux nous ont permis de mettre en évidence un certain nombre de particularités et de difficultés inhérentes à ces sols.

C'est ainsi que l'on aboutit à une surestimation des valeurs E ou L, lorsque l'on opère sans entraîneur, car une partie du ^{32}P introduit est fixée sous forme non labile. On sait que l'on utilise la formule d'équilibre isotopique $\frac{R}{E} = \frac{r}{p}$, dans laquelle R est la radioactivité totale introduite, E le phosphore labile cherché, r et p respectivement la radioactivité et la teneur en phosphore d'une partie aliquote du système. Si R est surestimée, il en est de même de E ; or, si une partie de ^{32}P

introduit est fixée sous forme non labile, elle ne participe plus à l'équilibre isotopique et ce n'est qu'une fraction de R qu'il faudrait faire intervenir dans le calcul.

On pourrait envisager de surmonter cette première difficulté en réalisant un équilibre préalable entre le phosphore du sol et sa solution ; car, si l'on n'introduit ^{32}P qu'après obtention de cet équilibre préalable, il ne doit plus être fixé sous forme non labile ; mais il se présente alors une seconde difficulté, qui tient au fait que l'obtention de l'équilibre exige un temps très long. Les valeurs trouvées pour E, par exemple, ne sont alors qu'approximatives.

On peut aussi envisager d'introduire ^{32}P en présence d'une certaine quantité connue de P d'entraîneur. La formule que l'on applique est alors :

$$\frac{R}{E + P} = \frac{r}{p}, \text{ d'où } E = \frac{R}{r} p - P.$$
 Mais, si une partie de cet entraîneur est passée sous forme non labile, ce qui est fréquent, la quantité P que l'on retranche est trop élevée et l'on aboutit à une valeur sous-estimée pour E, parfois même à une valeur négative, ce qui est évidemment impossible.

Ce sont ces nombreuses difficultés qui ont entravé les études sur le phosphore labile des sols tropicaux jusqu'à ce jour.

On a cependant enregistré, dans ces recherches, un certain nombre de faits favorables. On a pu mettre en évidence, en particulier, le rôle bénéfique de la matière organique sur la dynamique du phosphore : un terreau, agité en présence d'un sol à fort pouvoir fixateur, améliore le facteur intensité et le facteur quantité, c'est-à-dire que la solution du sol est plus riche en phosphore et que le phosphore labile est lui-même plus élevé (4).

Il en est de même, d'ailleurs, lorsque l'on utilise de la chaux dans un sol ferrallitique très acide ; on relève ainsi le pH et l'on diminue la fixation du phosphore par précipitation (5).

1. 3 — Le facteur cinétique

Les valeurs E ou L que l'on trouve pour les sols pauvres en phosphore sont évidemment très faibles ; exemple : 10 ppm de P labile dans un sol sableux dunaire du Niger (sol à arachide). Ceci n'est pas fait pour surprendre, puisque, dans un tel sol, il peut exister jusqu'à 80 % du phosphore minéral sous forme incluse dans une gangue ferrugineuse, donc non labile.

Dans les sols plus riches, on peut trouver jusqu'à 100 ppm de phosphore labile. Ceci semble constituer un fait favorable, puisque le facteur quantité prend le relais du facteur intensité pour alimenter les racines des plantes, par renouvellement du phosphore de la solution du sol.

Encore faut-il que ce renouvellement se fasse facilement et avec une vitesse suffisante. C'est pourquoi le *facteur cinétique* est lui-même important. Dans deux sols ayant la même quantité de phosphore labile, la nutrition phosphorique des plantes peut être plus ou moins bien assurée, suivant que la vitesse de renouvellement du phosphore de la solution du sol est plus ou moins grande.

Un certain nombre de ces études ont fait l'objet d'une thèse de doctorat-ès-sciences, préparée par un étudiant au laboratoire de Fertilité des Sols de l'IRAT, à Nogent-sur-Marne (6).

Les recherches se poursuivent dans ce domaine ; elles doivent permettre de mieux comprendre les phénomènes de réaction des phosphates dans des sols tropicaux et d'en améliorer les modalités d'application.

2 — RECHERCHES EXPERIMENTALES SUR LA FERTILISATION PHOSPHATEE

En raison de l'extrême diversité des sols et des cultures sur lesquels portent les études de l'IRAT, il a été nécessaire de mettre au point une méthodologie rationnelle de recherche (7) (8) (9). Cette méthodologie comporte les étapes successives suivantes :

- délimitation de zones écopédologiques homogènes, dans lesquelles les problèmes de fertilisation peuvent présenter une certaine similitude ;
- recherche des carences des sols dans ces diverses zones ;
- mise au point des formules de fumure susceptibles d'assurer le redressement de la fertilité des sols ;
- mise au point de fumures d'entretien, en fonction des rotations et des systèmes de culture adoptés ;
- étude des modalités optima d'application des engrais.

2.1 — Recherche de la carence phosphatée des sols

Les études analytiques peuvent fournir des informations précieuses sur les réserves en phosphore du sol, sur l'importance du phénomène de fixation et sur la nutrition phosphorique des plantes. Mais c'est souvent insuffisant pour savoir si les engrais phosphatés seront efficaces. On fait alors appel à la méthode expérimentale, soit en vases de végétation, soit directement en parcelles.

La méthode des essais en vases de végétation appliquée à l'IRAT (10) (11) est une méthode soustractive ; les traitements mis à l'étude sont les suivants :

fumure complète : N.P.S. K. Ca. Mg. Oligo-éléments ;

- » » sauf P ;
- » » » S ;
- » » » K ;
- » » » Ca ;
- » » » Mg ;
- » » » oligoéléments ;

N seul ;

témoin absolu sans aucun apport d'élément fertilisant.

On cultive du ray-grass (ou dans certains cas du *Sorghum alnum*) dans des petits vases en matière plastique contenant environ 1 kg de sol. Il est possible d'effectuer plusieurs coupes successives. Par comparaison des rendements des deux traitements « Fumure complète » et « Fumure complète sauf P », on voit s'il y a ou non carence en phosphore dans le sol et quel est le degré de gravité de cette carence. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être appliquée sur une seule station centrale (il suffit de transporter 50 kg de sol provenant du terrain que l'on veut étudier) et de pouvoir s'affranchir des aléas climatiques (on opère sous abri et apporte à tous les vases la quantité d'eau nécessaire). Elle présente l'inconvénient de détecter les carences du sol avec une plante qui est une graminée (il n'est pas certain qu'il y aurait carence pour une autre culture) et dans des conditions de culture artificielles (profondeur de sol limitée pour l'enracinement — doses très fortes des éléments nutritifs apportés, d'où résulte un épuisement accéléré du sol pour l'élément qui ne figure pas dans le traitement).

Les essais effectués directement en parcelles sont appelés *essais d'orientation*. On utilise à l'IRAT des plans factoriels du type 2ⁿ, mettant à l'étude n facteurs à 2 niveaux, soit un niveau nul et un niveau effectif suffisant pour que, lorsqu'un facteur figure dans un traitement, il ne soit plus limitant. On obtient une information qualitative sur l'existence éventuelle d'une carence en phosphore et sur son degré de gravité.

Cette méthode présente les avantages et les inconvénients inverses de la précédente : les essais mis en place sur le terrain même que l'on étudie sont de surveillance plus difficile et ils sont soumis aux aléas climatiques ; mais ils sont réalisés dans des conditions de culture normales et avec la plante dont on veut étudier la fumure ; d'autre part, ils permettent de déceler les interactions éventuelles entre éléments NP par exemple (12).

Les informations qualitatives sur l'existence de la carence en phosphore, données par les deux méthodes sont, dans l'ensemble, concordantes. On note cependant quelques discordances : à la Réunion, par exemple, la culture de ray-grass révèle une carence en phosphore en vases de végétation, alors que la culture de canne à sucre en parcelles d'essai ne répond pas à la fumure phosphatée.

2. 2 — Le phosphore dans les formules de fumure minérale

Il faut envisager différents cas, suivant le degré d'intensification de la production agricole et suivant la situation économique des Etats et les possibilités de vulgarisation qui en découlent (13) (14).

On est fréquemment conduit à mettre au point, pour les services de vulgarisation et les sociétés de développement, des formules de fumure dites *économiques*, qui, en raison de leur faible prix de revient, sont accessibles à toutes les exploitations agricoles. Ces formules présentent le grand avantage de faciliter le démarrage de l'opération fertilisation dans des pays et sur des cultures pour lesquels elle n'a pratiquement jamais été entreprise jusqu'à ce jour. Elles ont, par contre, l'inconvénient de ne pas assurer un relèvement complet du niveau de fertilité du sol.

Dans d'autres cas, et en particulier dans les Etats qui vulgarisent déjà des formules économiques, on peut franchir une deuxième étape et tendre vers une amélioration foncière du sol assurant la capacité maxima de production. Il va d'ailleurs de soi que, s'il s'agit d'une culture riche (canne à sucre par exemple) ou d'un système de culture intensif dans lequel le poste fertilisation ne représente qu'une faible partie de l'investissement total initial (cultures irriguées par exemple), on doit opter d'emblée pour l'amélioration foncière du sol (15).

2. 2. 1 — Mise au point des fumures économiques

En fonction des carences principales qui sont décelées dans le sol, l'IRAT effectue des essais factoriels dans lesquels sont mis à l'étude les facteurs déficients, à plusieurs niveaux.

Dans le cas où l'on veut retenir trois facteurs, on utilise un plan 3^3 (exemple NPK ou NPS 3^3). Assez souvent on peut se limiter à deux facteurs et c'est alors le plan 4^2 qui convient le mieux (ex. NP ou SP 4^2) ; ce dernier plan expérimental permet de calculer, dans des conditions satisfaisantes, une surface de réponse à l'engrais, ainsi que des courbes d'isoproduction ; ces courbes sont particulièrement utiles pour le choix de la formule économique à conseiller.

On vérifie ensuite sur le plan multilocal, par des essais de confirmation ou d'adaptation, la validité des formules retenues. Exemples :

a) au Niger (16), sur arachide cultivée en sol ferrugineux tropical sableux, on a été amené à conseiller une formule à dominance phosphatée et apportant simultanément du soufre, lorsque cet élément est déficient dans le sol. Les essais de confirmation, effectués depuis 1965 dans les trois secteurs Centre, Est et Ouest, ont permis de préciser les formules et les doses les plus rentables à conseiller en vulgarisation ; on avait mis à l'étude les quatre traitements suivants :

témoin sans fumure ;

15 unités de P_2O_5 , sous forme d'une formule NPK 6-20-10 ;

15 » » » » de superphosphate simple ;

15 » » » » de superphosphate triple, mais avec addition de 6 kg de soufre.

L'efficacité de 15 unités de P_2O_5 est pratiquement la même dans les trois formules ; elle se traduit par un surcroît de rendement voisin de 500 kg de gousses d'arachide, soit 7 000 francs CFA à raison de 14 francs le kg d'arachide. Le bilan économique s'établit ainsi :

Formules	Prix de revient de la fumure en francs CFA	Bénéfice à l'hectare en francs CFA
NPK 6.20.10	2 625	4 375
super simple	1 900	5 100
super triple + soufre	1 350	5 650

Le bénéfice à l'hectare est au moins égal à 5 000 francs CFA, lorsque l'on utilise un superphosphate. La formule NPK est plus coûteuse et le bénéfice assuré plus faible.

D'autre part, bien que le superphosphate triple additionné de soufre soit moins coûteux que le superphosphate simple, c'est ce dernier que l'on a retenu pour la vulgarisation, car il n'exige pas de manipulation de mélanges. Dès 1965, on était arrivé à la même conclusion quant au choix du superphosphate simple ; 75 kg de cet engrais assuraient un bénéfice de l'ordre de 6 000 francs à l'hectare. On essaie de préciser actuellement les cas où l'on pourrait appliquer du superphosphate triple seulement, sans complément de soufre. Il faut signaler, enfin, que cette fumure de l'arachide est susceptible d'exercer un effet résiduel sur la culture de mil pratiquée l'année suivante (200 à 300 kg de grain supplémentaires), ce qui améliore encore la rentabilité de l'opération.

b) au Mali (17), on a été amené également à préconiser la vulgarisation de l'emploi du superphosphate simple sur arachide.

c) en Haute-Volta (18), sur céréales, les facteurs limitants sont le phosphore et l'azote. On a étudié l'efficacité du phosphate d'ammoniaque 18-50, à raison de 50 kg à l'hectare ; le prix de revient de cette fumure économique, qui apporte 9 unités d'azote et 25 unités de P_2O_5 , était de 2 500 francs environ.

Dans le cas du sorgho, les rendements moyens sont respectivement :

742 kg pour le témoin ;

1 237 kg pour le traitement 50 kg de phosphate d'ammoniaque.

La fumure augmente donc le rendement de 500 kg environ à l'hectare. A 12,50 francs CFA le kg, ce surcroît de rendement correspond à une plus-value de 6 250 francs. L'opération est rentable, puisque le prix de revient de la fumure n'est que de 2 500 francs.

2. 2. 2 — L'amélioration foncière des sols - Fumure de redressement phosphatée

On se fixe comme objectif le relèvement du niveau de fertilité des sols jusqu'à leur fertilité potentielle, afin qu'ils puissent concrétiser par de hauts rendements leur capacité maxima de production.

Dans les études expérimentales effectuées par l'IRAT, le phosphore était apporté à doses croissantes jusqu'à des niveaux très élevés, de façon que l'on eût la certitude d'atteindre le palier de la courbe de réponse. On opérait en présence de doses uniformes et suffisamment élevées des autres éléments (N, K et parfois même Ca, Mg, S, oligoéléments), afin que ces éléments ne fussent plus facteurs limitants de la croissance. Un traitement témoin absolu, sans aucun engrais, figurait également dans les essais.

Ces études expérimentales ont parfois donné des résultats spectaculaires. La potentialité des sols ainsi déterminée dépend évidemment de leur nature, de leur richesse en colloïdes en particulier, et aussi de la variété de l'espèce végétale cultivée. Exemples :

a) à Madagascar (19), les rendements obtenus en riziculture sans fertilisation, dans les sols hydromorphes humiques à gley cités au début, varient généralement de 2 500 à 3 500 kg de paddy à l'hectare. Une fumure NPK comportant 30 unités d'azote, 62 unités de P_2O_5 et 45 unités de K_2O , dont la vulgarisation est en cours, assure un rendement compris entre 4 000 et 5 000 kg/ha. En raison de la

carence presque générale du phosphore dans ces sols, on a mis à l'étude les doses suivantes de P_2O_5 , sous forme de phosphate tricalcique (ou bicalcique dans certains cas) : 0 - 100 - 200 - 300 - 400 et 1 000 kg à l'hectare. On a opéré généralement en présence de 120 unités d'azote sous forme de sulfate d'ammoniaque et 600 unités de K_2O sous forme de chlorure de potassium. On a pu ainsi obtenir des rendements très élevés. Exemple à Mahitsy :

témoin sans engrais :	2 800	kg/ha.
NK sans phosphate :	5 800	»
» + 100 kg P_2O_5 :	6 200	»
» + 200 » » :	6 500	»
» + 300 » » :	6 800	»
» + 400 » » :	6 700	»
» + 1 000 » » :	6 800	»

Avec une fumure de 300 kg de P_2O_5 à l'hectare, on atteint le rendement maximum voisin de 7 000 kg.

Il faut ajouter que, récemment, avec de nouvelles variétés de riz, on a atteint des capacités maxima de production encore plus élevées, de l'ordre de 8 000 kg/ha.

b) au Sénégal (20), on a effectué de nombreuses expérimentations sur l'amélioration foncière des sols à arachide, grâce à l'emploi des phosphates naturels. Le phosphatage de fond, réalisé par apport de 500 kg de phosphate naturel sur engrais vert ou sur jachère enfouie, est une technique efficace et rentable dans le cadre de la rotation quadriennale pratiquée : sole de régénération - arachide - céréale - arachide.

Dans les sols alluvionnaires de la Vallée du Sénégal, enfin, le problème de la fumure phosphatée n'est pas encore élucidé. A Richard-Toll et à Guede il faut atteindre des doses très élevées de superphosphate triple pour noter quelque efficacité, alors que 150 kg de phosphate d'ammoniaque agissent déjà sur les rendements ; les phosphates naturels y sont inefficaces (21) (22).

c) en Haute-Volta (23), sur sorgho, on a établi pour les principaux types de sols les courbes de réponse à des doses croissantes de P_2O_5 : 0 - 25 - 50 - 75 - 100 - 125 unités, sous forme de superphosphate triplé. On opérait en présence d'une fumure NK uniforme (100 unités de N + 50 unités de K_2O).

Les résultats obtenus montrent que la fumure phosphatée est très efficace et que le palier de la courbe est pratiquement atteint pour une dose de 50 unités de P_2O_5 ; cette fumure de redressement augmente en moyenne le rendement de 700 kg de grain à l'hectare. La fumure complète NPK (100 unités de N + 50 unités de P_2O_5 + 50 unités de K_2O) assure un surcroît de rendement, par rapport à la culture sans engrais, compris entre 1 000 et 1 500 kg.

2. 3 — Modalités d'application de la fumure phosphatée

En raison de la nature même des engrais phosphatés, de leurs caractéristiques de solubilité, en particulier et de la dynamique de l'élément phosphore, il se pose un certain nombre de problèmes quant au choix des formes d'engrais à utiliser et à leur mode d'application.

D'autre part, ce sont des engrais coûteux dans les Etats d'Afrique tropicale où l'on préconise actuellement leur emploi. L'unité de P_2O_5 a un prix de revient très variable suivant le lieu de livraison et la nature de l'engrais ; si elle est livrée dans les ports d'importation (Dakar - Abidjan - Cotonou - Douala), on a les prix moyens suivants :

60 à 75 francs CFA,	sous forme de phosphate bicalcique ;
60 » 70 » » » » »	superphosphate triple ;
80 à 100 » » » » » »	superphosphate simple.

Mais, sur les lieux d'utilisation éloignés des ports, en raison des frais de transport très élevés par voie ferrée ou voie routière, le prix de revient est beaucoup plus élevé.

Il est difficile, avec des frais de transport aussi élevés (17 000 francs CFA la tonne à Maroua, par exemple, dans le Nord-Cameroun) d'assurer la rentabilité de la fertilisation. C'est pourquoi il est important d'opérer un choix judicieux du phosphate à conseiller et de déterminer son mode d'application optimum, de façon qu'il soit le plus efficace possible.

On a effectué de nombreuses expérimentations dans ce domaine. Pour le choix de la nature du phosphate, il faut tenir compte des conditions climatiques, de la nature du sol, du système de culture adopté et aussi, évidemment, des caractéristiques propres de chaque engrais. Dans les régions à faible pluviosité, il faut choisir les phosphates les plus solubles, les superphosphates par exemple. C'est ainsi qu'au Niger on a constaté qu'une formule NPK 6-20-10 est plus efficace sur arachide lorsque son phosphore y figure sous forme de superphosphate au lieu de phosphate bicalcique ou de phospal. Lorsque la pluviosité est suffisante, on peut utiliser les phosphates hyposolubles ou même peu solubles, comme le phosphate naturel tricalcique. Au Sénégal et en Haute-Volta, c'est surtout dans les régions où il tombe plus de 800 mm de pluie que les phosphates naturels peuvent être efficaces.

La teneur en matière organique du sol peut jouer un rôle important ; dans un sol acide et riche en humus, le phosphate naturel se solubilisera plus rapidement ; c'est ainsi que dans les rizières malgaches, riches en matière organique et fortement acides, le phosphate tricalcique est efficace dès la première année ; dans les sols alluviaux de Richard-Toll (Sénégal), pauvres en matière organique et légèrement acides seulement, il est inefficace.

Dans les systèmes de culture intensifiés, avec rotation culturale dans laquelle chaque plante de la succession doit bénéficier de l'apport de phosphate, on peut pratiquer un phosphatage de fond en tête de rotation. Les nombreuses expériences effectuées au Sénégal (24), en Haute-Volta (25), au Mali, au Niger, au Dahomey, etc., ont montré que :

— des doses de 300 à 500 kg de phosphate tricalcique, enfoui en tête de rotation, exercent un effet positif sur les diverses cultures de la rotation ; dans certains cas cependant, cet effet ne se manifeste qu'au bout d'un ou de deux ans ;

— il semble y avoir avantage à enfouir le phosphate l'année même de la sole de régénération (jachère enfouie ou engrais vert) ;

- il est préférable d'utiliser un phosphate finement broyé ;
- il faut compléter la fumure phosphatée par une fumure azotée et potassique ;
- pour l'ensemble d'une rotation, le bilan économique peut être en faveur de l'emploi du phosphate naturel, de préférence au phosphate bicalcique ou au superphosphate triple.

On a également fait des recherches sur l'efficacité comparative des divers superphosphates, du bicalcique, du phosphate d'ammoniaque, du métaphosphate de potasse. Lorsqu'il se pose un problème de soufre, on choisit le superphosphate simple. Le phosphate d'ammoniaque, pour lequel les études sont très récentes, semble intéressant du fait de l'apport simultané de P_2O_5 et d'azote ; mais il est déséquilibré (50 unités de P_2O_5 pour 18 unités d'azote seulement) et il faut souvent prévoir un complément azoté. Le métaphosphate de potasse est aussi efficace que les autres phosphates classiques, mais son prix de revient est pour l'instant prohibitif.

RESUME ET CONCLUSIONS

Les sols d'Afrique tropicale sont généralement pauvres en phosphore ; font exception ceux qui sont formés sur roches volcaniques et ceux qui sont riches en matière organique. D'autre part, lorsqu'ils ont subi une longue évolution pédologique, la majeure partie de leur phosphore minéral se trouve bloquée sous une forme inaccessible aux racines, du fait de son inclusion dans une gangue ferrugineuse. Enfin, des phénomènes de précipitation en milieu acide contribuent encore à en rendre une autre partie très peu labile. C'est pour ces diverses raisons que la carence en phosphore est si fréquente et si accusée.

Les recherches effectuées par l'IRAT, sur la dynamique du phosphore dans les sols tropicaux, ont montré que le facteur intensité, c'est-à-dire la teneur de la solution du sol, se trouve à un niveau extrêmement bas ; les racines des plantes n'ont donc à leur disposition immédiate, dans cette solution du sol, que des quantités minimales de phosphore. D'autre part, le facteur quantité, c'est-à-dire le phosphore labile qui existe dans le sol, est généralement lui-même à un faible niveau. Lorsqu'il est plus important, il n'en résulte pas obligatoirement une alimentation phosphorique satisfaisante des plantes, car le facteur cinétique, c'est-à-dire la vitesse avec laquelle le phosphore labile peut renouveler celui qui est en solution, joue également un grand rôle.

Ces études n'ont été rendues possibles que grâce à l'utilisation de la technique de la dilution isotopique ; mais elles ont exigé une adaptation de cette technique, du fait des difficultés créées par l'intervention de phénomènes de fixation du phosphore sous forme non labile.

Les études expérimentales ont mis en évidence l'existence de la carence phosphatée. Elles ont permis la mise au point de formules de fumure économiques, c'est-à-dire efficaces, rentables et faciles à vulgariser en raison de leur prix de revient peu élevé. On a déterminé également les fumures de redressement phosphatées, susceptibles de conférer aux sols leur capacité maximale de produc-

tion ; on peut en envisager l'emploi dans le cas des systèmes de culture intensive ; mais en culture traditionnelle, leur prix de revient élevé est un obstacle à leur adoption, dans les conditions actuelles.

Par souci d'efficacité et de rentabilité maxima, on a été conduit à étudier les diverses modalités d'application des engrais phosphatés ; on a abouti ainsi à un choix judicieux de la nature des phosphates à utiliser en fonction du climat et du sol.

Il est important de rappeler, enfin, qu'il serait très utile de mettre au point une technique pratique d'enrichissement des sols en matière organique, ce qui contribuerait à améliorer la dynamique du phosphore et à alléger les dépenses du poste « fumure phosphatée ».

BIBLIOGRAPHIE

- (1) BOUYER (S.), DAMOUR (M.). — Les formes du phosphore dans quelques types de sols tropicaux. — VIII^{me} Congrès International de la Science du Sol, Bucarest, 1964, C.R., vol. IV, pp. 551-61.
- (2) ROCHE (P.). — Contribution à l'étude du statut phosphorique des sols de Madagascar. Incidence sur les problèmes de fertilité. — L'Agronomie Tropicale, XXII, 3, pp. 249-308 (mars 1967).
- (3) TRUONG (B.), BHAT (K.K.S.), BOUYER (S.). — Dosage du phosphore à l'état de traces dans les solutions en équilibre avec le sol. — C.R. Acad. Sc., Paris, t. 270, pp. 2943-45 (15 juin 1970).
- (4) BHAT (K.K.S.), BOUYER (S.). — Influence de la matière organique sur le phosphore isotopiquement diluable dans quelques types de sols tropicaux. — Colloque AIEA « Isotopes and Radiation in soil Organic Matter Studies », Vienne (1968), pp. 299-313.
- (5) BHAT (K.K.S.), TRUONG (B.), BOUYER (S.). — Détermination de la valeur L d'un sol ferrallitique. Action de la chaux. — Colloque OUA/AIEA sur les utilisations de l'Energie Atomique à des fins pacifiques, Kinshasa, 28 juillet-1^{er} août 1969.
- (6) BHAT (K.K.S.). — Contribution à l'étude de la dynamique du phosphore dans les sols tropicaux et de ses conséquences sur l'alimentation phosphorique des végétaux. — Thèse, Fac. Sc. Orsay (26 mai 1970).
- (7) CHAMINADE (R.). — Les recherches sur la fertilisation à l'IRAT. Principes de base, techniques, résultats expérimentaux. — Colloque OUA/STRC sur la conservation et l'amélioration de la fertilité des sols, Khartoum (1965), pp. 203-12.
- (8) BOUYER (S.). — Fertilité et fertilisation des sols en Afrique Occidentale - Aspects méthodologiques. Exemples concrets. — Réunion FAO sur la fertilité des sols et l'utilisation des engrais en Afrique Occidentale, Ibadan (1962).
- (9) BOUYER (S.). — Considérations d'ordre pratique sur l'étude de la fertilité des sols tropicaux. — L'Agronomie Tropicale, XVIII, 9, pp. 933-8 (sept. 1963).
- (10) CHAMINADE (R.). — Etude des carences minérales du sol par l'expérimentation en petits vases de végétation. — Science du sol, 2^{me} semestre 1964, pp. 157-68.
- (11) CHAMINADE (R) *et al.* — Bilan de trois années d'expérimentation en petits vases de végétation - Mise au point technique - Résultats. — L'Agronomie Tropicale, XX, II, pp. 1101-62 (1965).
- (12) BOUYER (S.). — L'interaction azote × phosphore dans les recherches sur la fertilisation des Sols Tropicaux. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 397-410.
- (13) WERTS (R.), BOUYER (S.). — Problèmes posés par la vulgarisation des engrais au Dahomey. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 2, pp. 2117-2121.
- (14) BOUYER (S.). — Engrais et politique de l'engrais. — Colloque « Les priorités de la recherche agricole dans le développement économique de l'Afrique », Abidjan (1968). — Académie Nationale des Sciences des Etats-Unis, C.R., tome II, pp. 50-60.

- (15) CHAMINADE (R.). — L'élévation du niveau de fertilité des sols tropicaux, condition de l'établissement de systèmes de culture intensifs. — Colloque « Les priorités de la Recherche Agricole dans le développement économique de l'Afrique », Abidjan (1968). — Académie Nationale des Sciences des Etats-Unis, C.R., tome II, pp. 18-24.
- (16) LIENART (J.M.), NABOS (J.). — Les recherches sur la fertilisation de l'arachide et l'amélioration foncière des sols au Niger. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 1046-57.
- (17) PIERI (C.). — Bilan des recherches sur la fumure phosphatée au Mali. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 1139-49.
- (18) DUPONT de DINECHIN (B.). — Observations sur la priorité à accorder en vulgarisation à la fumure des céréales de culture sèche en Haute-Volta. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 1100-8.
- (19) VELLY (J.), CELTON (J.), ROCHE (P.). — Fertilisation de fond en rizière à Madagascar. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 916-91.
- (20) NICOU (R.). — Note sur l'intensification possible de l'agriculture tropicale sèche. — Colloque OUA sur la Conservation et l'Amélioration de la Fertilité des Sols, Khartoum (1965), C.R., pp. 232-7.
- (21) COUEY (M.), BOUYER (S.), CHABROLIN (R.), DEJARDIN (J.). — Etudes récentes sur la fertilisation du riz dans le delta du Sénégal. — II^{me} Réunion F.A.O. sur la Fertilité des Sols et l'Utilisation des Engrais en Afrique de l'Ouest, Dakar (1965).
- (22) COUEY (M.), BOUYER (S.), CHABROLIN (R.), COURTESOLE (F.). — Réponse du riz à la fumure dans la région du Fleuve Sénégal. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 720-30.
- (23) DUMONT (C.), DUPONT de DINECHIN (B.). — La fumure phosphatée des cultures vivrières en Haute-Volta. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 639-56.
- (24) POULAIN (J.F.), MARA (M.). — Comparaison de l'action de différents engrais phosphatés utilisables au Sénégal. — Colloque OUA sur la Conservation et l'Amélioration de la Fertilité des Sols, Khartoum (1965), C.R., pp. 358-77.
- (25) DUPONT de DINECHIN (B.). — Observations sur l'intérêt des phosphates naturels pour la fumure des céréales en Haute-Volta. — Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 novembre 1967, C.R. tome 1, pp. 657-68.