

ORSTOM

Module E

FIXATION du PHOSPHORE
dans les sols riches
en SESQUIOXYDES

ZOMBRE Nabsanna P.

Mars 1981

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° 29716 ex 1

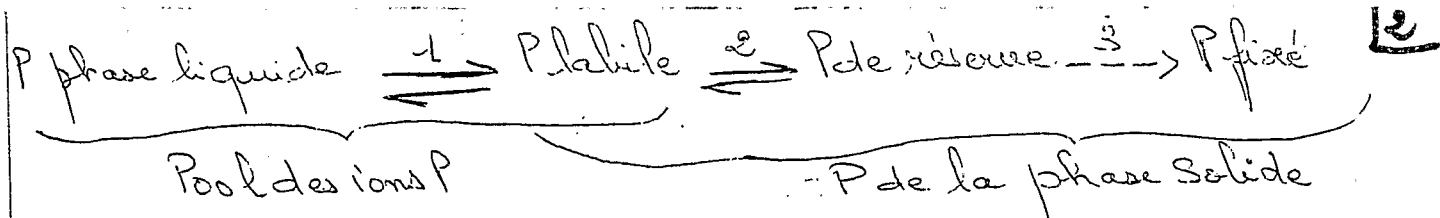
Cote B 1

Etude bibliographique

Fixation du phosphore dans les sols riches en sesquioxides.

Introduction

L'étude de la fixation du phosphore dans les sols riches en sesquioxides est d'importance indéniable; car si l'on semble avancé dans cette étude en ce qui concerne les sols des pays tempérés, il n'en est pas de même en pays "chauds". On sait par ailleurs que ces sols présentent une grande extension dans le monde et sont malheureusement caremés en phosphore pour la plupart; en effet selon DABIN (1967), "il est admis que les sols tropicaux sont en majorité très pauvres en acide phosphorique, ce qui les maintient à un niveau de fertilité souvent très bas, le phosphore agissant non seulement sur l'alimentation des plantes supérieures, mais aussi sur certains métabolismes biologiques du sol qui sont générateurs de fertilité...". Il est longtemps établi que le phosphore existe dans le sol sous plusieurs états et que ces formes sont en équilibre entre elles, grâce aux travaux de Changet Jackson (1957), Schofield (1955), DABIN (1963)... Selon Schofield (1955), les états de phosphore dans le sol (composés minéraux, état adsorbé, composés organiques, état ionique), s'équilibrent comme l'indique le schéma ci-après:



- 1 : réversibilité rapide
 2 : réversibilité lente
 3 : irréversibilité

Dans les sols riches en sesquioxydes, c'est la forme à l'état adsorbé sur argile et sur hydroxydes qui est prédominante, d'où une étude de fixation de phosphore par ces sols permettra de comprendre les mécanismes intimes des phénomènes physico-chimique entrant en jeu, ce qui aurait pour but de relever leur niveau phosphorique.

En parcourant la littérature relative au sujet, il est apparu que les différents auteurs l'ont abordé sous plusieurs angles que nous pouvons regrouper en quatre points : ci-dessous :

- les méthodes d'évaluation qualitative et quantitative ;
- l'étude des phénomènes d'adsorption et de désorption dans ces sols ;
- l'étude des formes de phosphore et de leur répartition dans les sols riches en sesquioxydes ;
- l'étude régionale de fixation de phosphore à caractère appliquée.

I Méthodes d'évaluation qualitative et quantitative de

phosphore dans les sols riches en sesquioxydes

a) Phosphore total

C'est le phosphore qui existe dans le sol à un moment donné ; de toutes les méthodes existantes, celle utilisant l'acide nitrique concentré et bouillant est utilisée depuis longtemps et avec succès pour différencier la richesse en phosphore des sols. B. DABIN (1951-1954, 1956), S. BOUYER (1958) ont montré que cette méthode d'utilisation assez simple donne des chiffres analytiquement variables : sous des climats différents et dans des sols différents, les niveaux de

phosphore que l'on peut considérer comme bons, moyens ou mauvais sont variables : le niveau moyen est de 0,15% P_2O_5 dans les sols sableux des régions sèches ; 0,20% dans les sols argileux ; 0,5% dans les sols sableux de région humide et plus dans les sols humifères. D'après B. DABIN (1956), il existe une relation statistique dans l'horizon supérieure des sols entre N total et P_2O_5 total, le rapport moyen de N/ P_2O_5 étant de 2. L'expérience aurait donné le même rapport sensiblement. Moulinier (mars 1962) confirme les résultats sur sol à cacaoyer en Côte d'Ivoire. En 1976, au Cameroun, Müller et Gavaud ^{représentent le} graphique ^{de DABIN} ^{sur lequel} ^{il} ^{est} ^{indiqué} ^{les} ^{limites} ^{de} ^{carence} ^{tot} ^{en} ^{phosphore} ^{total} ^{liés} ^{aux} ^{taux} ^{de} ^{matière} ^{organique} ^{et} ^{d'azote} ^{total}. D'après S. Bouye (1971) "Des études analytiques de base montrent que la teneur en phosphore total dans les sols d'Afrique tropicale et Madagascar présente des variations considérables en fonction de l'origine géologique du sol, de sa teneur en matière organique et de son degré d'épuisement."

Dans ^{certain} ^{sols} ^{tropicaux}, le phosphore total est pratiquement la seule forme soluble ; s'il ne traduit pas le phosphore prélevé directement par les plants, il donne une idée de la nature de l'élément fertilisant à apporter pour avoir la réponse (N ou P ou NP).

b) Phosphore ^{dit} assimilable

Il s'agit du phosphore labile ou phosphore aisément réversible au sens de Schofield. Il est dosé, plutôt estimé soit par des techniques chimiques soit par des techniques isotopiques. Il existe plusieurs méthodes chimiques et selon les pays. Les réactifs chimiques, - d'après Bonneau H. et B. Souché (1979), reposent sur l'utilisation de réactifs d'extraction qui, compte tenu de leur nature et surtout du pH choisi déplacent les équilibres existant dans le sol : le choix de ces réactifs a souvent été justifié par le fait qu'ils simuleraient telle ou telle réaction naturelle : acidifiante, complexante etc - Ces réactifs doivent agir de façon sélective sur les différentes formes. Pour les ^{sols} ~~formes~~ acides ou neutres on préfère la méthode Dyer (1934)

4

D'après DABINÒ (1967) "les différentes méthodes donnent des corrélations assez voisines les unes des autres, mais une technique appelée Olsen modifiée nous permet d'extraire 60% du phosphore ajouté, alors que la méthode d'Olsen simple n'extraît que 20% et la méthode Truog 10%. Nous avons pensé que ce fort pouvoir d'extraction pouvait être intéressant pour l'analyse des sols tropicaux pauvres en phosphore". La composition du réactif est un mélange alcalin + complexants de fluore d'ammonium et de bicarbonate de soude ($\text{FNH}_4 0,5\text{N} + \text{Co}_3\text{NaHCO}_3$ à pH 8,5) avec sol / solution = 1/50. Il semblerait selon le même auteur que ce réactif extrait en totalité le phosphore lié à l'aluminium et partiellement le phosphore lié au calcium et lié au fer suivant la solubilité variable de ces derniers. En comparant la méthode Olsen, Citrique et Truog et Olsen modifié, sur prof de sol acide et sur prof de sol neutre l'Olsen modifié était la meilleure. Par rapport à la méthode de Chang et Jackson, la méthode Olsen modifiée a donné dans des analyses en sols feuillitiques acides de Côte d'Ivoire et en sol neutre de Salvador, des résultats exprimant une bonne représentation du phosphore assimilable.

Une étude de disponibilité de différentes fractions de phosphate réalisée par Plessis S.F. et T. BURGER (1966) consistant à déterminer la fraction de P du sol la plus utilisée par les plants et à obtenir un réactif d'extraction de P assimilable a montré que des 3 réactifs essayés, la résine donnait la meilleure corrélation avec les fractions.

c) Méthodes de dosage des différents formes.

- le phosphore du sol comprend :
- le phosphore soluble (PS) extrait par une solution $\text{NH}_4\text{Cl N}$.
 - le phosphore lié à l'aluminium P-Al extrait par une solution $\text{NH}_4\text{F } 0,5\text{N}$ pH 7, pH 8,5 → HANOTIAUX (1964)
 - le phosphore lié au fer, extrait par la soude 0,1N (P-Fe)

12

- le phosphore lié au calcium (P-ca) extrait par $H_2SO_4, 0,5N$
- le phosphore résiduel (P-r) extrait par attaque nitro perchlorique
- le phosphore organique. extrait après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée ou par calcination. Ces méthodes sont de Chang et Jackson (1947) simplifiées. D'après Bonneau H. et B. Sercher "Malgré les améliorations proposées par HANONIAUX (1964), une redistribution du phosphore a lieu en cours d'extraction (Conesa 1969, Gachon, 1972.) Ginsburg et Lebedeva ont envisagé pour accroître la sélectivité des réactifs d'ajouter dans chaque extractant un complexant du phosphore. La comparaison de cette méthode à celle de Chang et Jackson ne révèle pas de différences significatives (Conesa et al, 1969)". Une étude du rapport entre P extractible et les formes de P dans quelques sols tropicaux humides d'après A. AHMED et B. ISLAM (1975) a montré que les méthodes choisies pouvaient se classer en 3 groupes: celles qui dissolvent aisément P-ca et P-sl, celles dissolvant P-sl et P-ca et enfin celles qui n'étaient sélectives pour aucune des formes (les méthodes aux résines échangeuses d'anions et à code O, et N.).

D'après B. DABIN (1967) "la carence relative entre phosphore et azote peut être appréciée d'après le rapport P_{2O_5} assimilable / N total. on peut émettre l'hypothèse qu'au dessus de 1/10, le sol aura davantage besoin d'azote que de phosphore, entre 1/10 et 1/20, le sol pourra avoir besoin à la fois des deux; et au dessous de 1/20, la carence en phosphore sera parfois supérieure à celle de l'azote."

II - Etude des phénomènes d'adsorption et de désorption

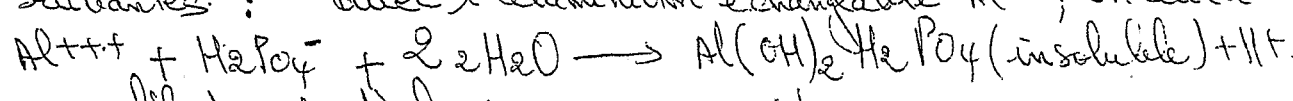
1975 a) mécanismes d'adsorption

- les constituants du sol fixant les ions phosphoriques sont:
 - les hydroxyde de fer et d'Aluminium.
 - les colloïdes minéraux et organiques
 - le Calcaire

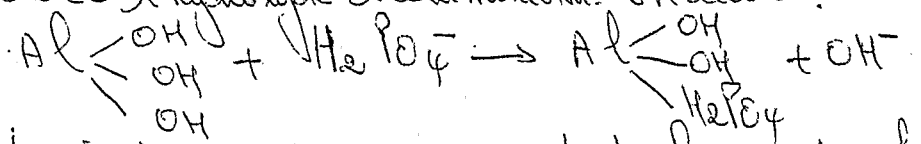
La fixation dans les sols riches en sesquioxides interesse surtout les formes liées aux argiles et les oxydes. Les mécanismes d'adsorption ont longtemps été étudiés par Boullier (1954-1956) et Blanchet (1960-1966)

En principe, il n'existerait aucune adsorption à la surface des hydroxydes à l'état cristallin (gibbsite, goëthite) Blanchet (1960) Backe (1966) constate le phénomène contraire.

Le chimiotropisme entre le phosphore et l'aluminium et le fer est très important; ainsi on explique les échanges d'anions phosphoriques avec les ions OH^- ce qui peut se traduire par les réactions suivantes: avec l'aluminium échangeable Al^{+++} , on aura



avec l'hydroxyde d'aluminium, on avait:



les réactions s'exprimeraient de la même façon avec le fer, les formes des ions phosphate dans les solutions dépendent du pH

- H_2PO_4^- pour un milieu acide
- HPO_4^{--} pour un milieu moyennement acide
- PO_4^{---} pour un milieu alcalin

b) Etude sur des minéraux purs.

Ces genres d'études ont surtout porté sur des oxydes de fer et des hydroxydes d'aluminium et des argiles (respectivement hémattite, goëthite, gibbsite et kaolinite). D'après Dr. Aramburo (1971), l'adsorption des ions phosphatés par les surfaces des oxydes est en corrélation étroite avec la surface spécifique des oxydes. Il souligne aussi l'importance du pH qui peut jouer sur la précipitation du phosphate monocalcique monohydraté en un phosphate ayant une composition proche du phosphate bicalcique dihydraté. Perrot K.W (1975) sur une étude faite sur des feuilles de mica cliuées récemment montre qu'il se produit un réarrangement de PO_4 adsorbé au cours du temps sur les surfaces d'hydroxydes de Al et de Fe. Ce réarrangement ralentirait la désorption et pourrait causer la fixation de P dans le sol. Healy K.R. et al (1976) montre que les différents cations du sol avaient des effets sur l'adsorption de P par les argiles lorsque les effets des sels neutres sur le pH sont également considérés.

7

Des expériences d'adsorption de P en fonction du temps par les sols et les oxydes de fer hydraté par Ryden J.C. et al (1977) et de BAA YOSEF (1976, 1978) montrent que l'écart entre les isothermes d'adsorption et de désorption diminue avec le temps et fonction de la méthode de désorption, et que la réadsorption d'une partie de si lce dissoute contribue à l'accélération du procédé de désorption.

La libération de P à partir des réseaux synthétiques indique que la solubilité dépend de la composition du réseau, du pH et de la granulométrie (Fyfe W.S. et al, 1978). Une étude de désorption de P à partir de la goéthite par MADRID L. et POSNER. AM. (1979) montre une réversibilité apparente des réactions d'adsorption due à une lente adsorption d'une partie de P après une adsorption initiale très rapide; le même comportement est observé lors de la désorption. Une dizaine d'auteurs ont montré depuis une dizaine d'années l'influence du pH, de la matière organique sur l'adsorption de P.

C) Étude de la dynamique du phosphore dans les sols riches en sesqui-oxydes

La méthode de dilution isotopique \rightarrow valeur E
Le principe consiste à agiter un sol avec une solution phosphorique contenant ^{32}P en quantité connue. ^{32}P se répartit rapidement entre la phase liquide et la phase solide (Paisement réversible). Le taux de ^{32}P diminue dans la phase liquide de la quantité aisément fixée par le sol. Celle-ci (P labile) est déduite de l'abaissement du taux de ^{32}P dans la phase liquide. On l'appelle P isotopiquement échangeable ou P auto-diffusible; il aurait une bonne corrélation avec le P assimilable (chimique). On définit les valeurs L (représentant la réserve du sol) et A indiquant l'assimilabilité de cette réserve exprimée en unité d'engrais pris comme référence. Blanchet (1965) a montré que pour des sols différents il n'existe pas de rapport constant entre les valeurs de L et A. D'autre part SASPORTES (1967) a constaté que pour un même pH l'addition de fer et d'aluminium au sol, ne modifie pas le rapport entre ces deux valeurs. Actuellement, il semblerait opportun de déterminer pour un type de sol les valeurs A et L, puis de suivre les fluctuations de E. En effet Gochon 1966, vient de signaler que

cette dernière valeur donne de loin, par rapport aux méthodes de dosage chimique classiques, des résultats beaucoup plus conformes aux réponses des végétaux à la fertilisation phosphatée.

d) - la cinétique de la désorption

Le phénomène est lié à la mobilité des ions adsorbés comme la cinétique de la dilution isotopique, lorsqu'on mesure P isotopiquement dilué après des temps variables de contact, on constate qu'une fraction de ions P₀ est très mobile (correspond à la fraction fixée par les bases); une autre partie plus énergiquement fixée (correspond à la fraction adsorbée par les atomes Al du réseau et ou les hydroxydes métalliques colloïdaux). Blanchet et Chaumont à l'aide des résines anioniques étudient l'influence de plusieurs facteurs intervenant sur la désorption.

- Jvo et Fox¹⁹⁷² montre que pour les sols tropicaux la valeur critique de $B_{0.5}$ en solution devrait être de 0,2 ppm en reprenant Gachon qui a montré que la concentration du phosphore ^{restant} en solution augmente en fonction de la conc. ajoutée, ceci à partir d'une sol/solution = 1/4, pour des sols tempérés. Ils déterminent des courbes de fixation à température constantes dites isothermes. Selon H. Sinha (1971), Hernandez (1974), une étude de désorption de P dans les sols tropicaux montre que le réactif ne fonctionne pas à faible concentration (0,0025 M) d'acide citrique. quand le sol a un fort pouvoir fixateur d'où on obtient des isothermes difficiles à interpréter, alors que les isothermes sont meilleures à des concentrations plus élevées (0,1 M). Des quatre modèles utilisés pour décrire la cinétique de P dans le sol, les modèles de transfert de masse et de cinétique de Langmuir ont très bien représenté les données expérimentales (NOVAK, 1975). Les isothermes d'adsorption ont montré selon HOPE G.D et E-SYF (1976) une dépendance du rapport solution / sol interprété en termes de nombre de sites de concentration de P d'adsorption de P et de concentration initiale de P des sols.

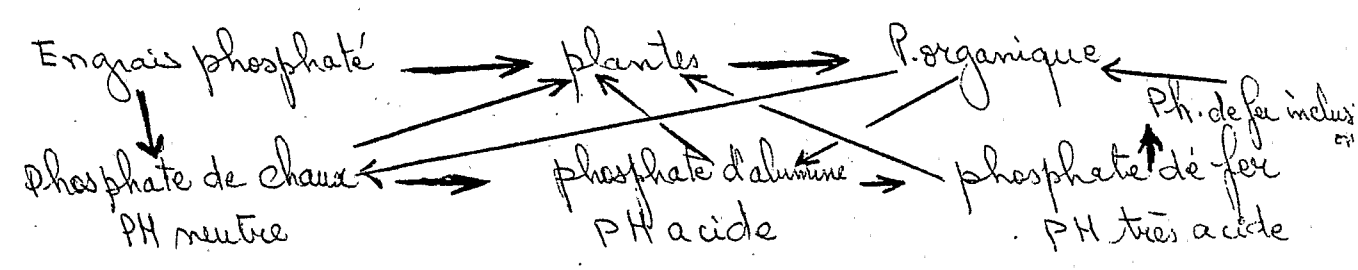
STOYANOVA (1975) exprime la libération de P par une équation de la forme $R = P(t^{0.5} + b)$ où R est b sont des constantes, P est la quantité de P absorbée par la plante au temps t.

HARTER R.D et FOSTER B.B (1976) expérimentent le déplacement de P dans les sols par simulation sur ordinateur. Ces auteurs pensent que l'avantage par rapport au modèle mathématique est de pouvoir calculer la durée possible du pouvoir épurateur d'un sol. D'autres auteurs comme PARFITT R.L (1971) et Mac (LANOHI) et al) et CABREJA (1977) proposent d'autres modèles pour étudier l'adsorption de P par des oxydes de fer. En 1978, CABREJA établit une équation théorique pour préciser l'influence de la concentration en P de la solution et de la durée d'attaque sur l'adsorption de P. BARROW N.S (1978) critique les descriptions des courbes de l'adsorption de P et propose un traitement statistique adéquat pour décrire les différents équations qui déterminent et décrivent le phénomène. POSNER A.H. et al (1980) émet une réserve à l'égard du fractionnement des isothermes d'adsorption : expérimentaux en plusieurs isothermes de Langmuir.

En conclusion, on peut dire que l'état actuel de la question est que les auteurs discutent de la validité de telle ou telle méthode. En effet, il existe plusieurs modèles pour expliquer les phénomènes d'adsorption et pour les quantifier; les modèles même sur des minéraux purs ne sont pas déjà exempts de critique, puisqu'ils font intervenir un certain nombre de paramètres qui peuvent être contrôlables au labo et difficilement en plein champ.

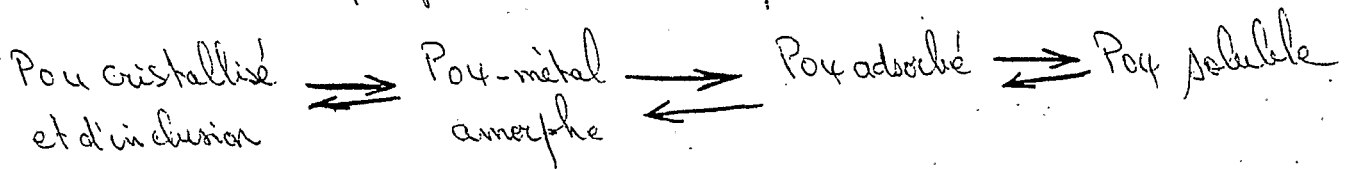
III - Les Formes de phosphore et leur répartition dans les sols riches en sesquioxides.

a) cycle du phosphore dans les sols tropicaux (DABIN B. (1963))

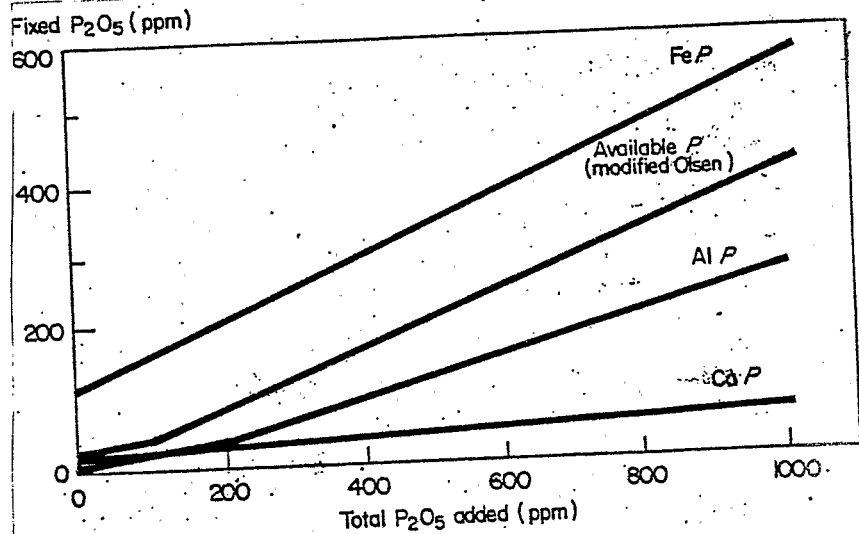
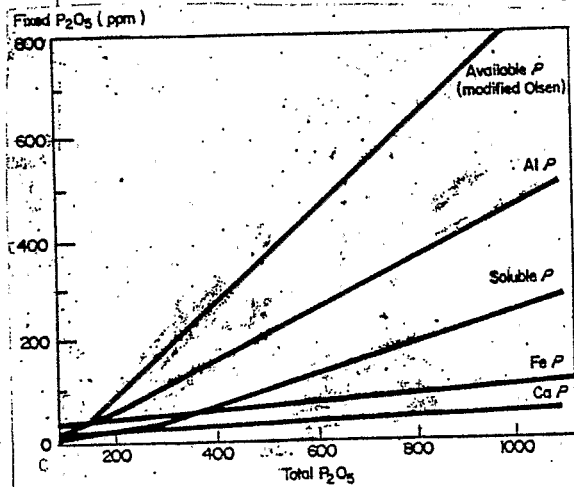


D'après Chang et Chu cité par B. DABIN (1963) : un phosphate de chaux appliqué au sol se transforme d'abord en phosphate d'aluminium puis évolue lentement vers les formes de f-phosphate de fer de moins en moins solubles. La forme ultime serait donc le phosphate de fer d'inclusion.

L'évolution du phosphore dans les sols peut se schématiser comme suit



DABIN (1970), dans une étude de fixation du phosphore sur les sols tropicaux (sols ferrallitiques de Madagascar et d'Afrique, sols ferrugineux tropicaux du Tchad,) obtient des résultats indiquant 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 1000 ppm ; cela dépendait beaucoup de l'évolution et du pH du sol : exemple de deux sols de nature différente l'un hydromorphe et l'autre ferrallitique (voir graphiques I et II) DABIN (1970).



Sol Sableux hydromorphe
- du Tchad (3 jours de contact
- avec P soluble)

Sol ferrallitique du Cameroun
(3 jours de contact avec du phosphate soluble)

- Fractionnement par la méthode Chang et Jackson

173

Bohn (1970) montre que la répartition des ~~phosphates~~ complexes phospho-ferriques et aluminiques se répartissent du pH acide au pH faiblement acide.

Khanma S.S. et Mahajan K.K. (1971) trouve que Al est un facteur important de rétention aussi bien en ^{sol} acide qu'en ^{sol} alcalin.

Schri Vasta, P. et d'autres auteurs trouvent Po que P-Al est particulièrement abondant dans les sols de l'Inde. Weaver R.H. et al (1975) et Uzu (1975) dans les oxisols du Nigeria, le phosphore minéral n'est classé, comme suit $\text{Po} > \text{P-Fe} > \text{P-Al} > \text{P-Ca}$ selon Uzu, la répartition des différentes formes était liée à la roche-mère, au degré de dégradation et aux conditions de drainage.

EU DO (1977) dans le même sens, étudie la répartition dans des sols du Nigeria suivant une toposéquence : dans les plus altérés et les mieux drainés les formes secondaires P-Al et P-Fe sont les plus prédominantes alors que P-Ca domine dans les moins bien drainés ; dans tous les cas P résiduel était plus important.

Pour BIDAPPA (1978) dans les sols latéritiques, le niveau d'humidité a une grande influence sur la transformation de P soluble-eau ; après des expériences d'incubation, il trouve des formes par ordre décroissant comme : Organique > Prédit > P-Fe > P-Al > P > P-Ca > Po. Il conclut que Al-P et Fe-P semblent être la source principale d'alimentation des plantes.

Une étude récemment de (1980) de Quiros S. et al sur la neutralisation de l'aluminium échangeable et le précipité de P dans des sols de Porto Rico, on a montré le rôle dépressif de Al échangeable sur la matière sèche.

En conclusion, il y a une différence de répartition des formes quand on a à faire à un sol exondé et à un sol hydromorphe. et pour chaque type de sol les variations des pH & formes sont fonction de pH (DABIN, 1964). mais aussi de la réaction en FeO_2 et CO_2 .

IV

Etude régionale de fixation de phosphore dans les sols

riches en sesquioxydes

Bouyer (1956), DABIN B. (1956, 1960, 1963), en analysant les sols tropicaux mettent l'accent sur ^{leurs} l'interprétation agronomique. Selon DABIN B. (1963) il semble que les besoins des sols en engrais phosphatés puissent être appréciés dans les sols tropicaux par la somme des différentes formes de phosphore minéral non rétrogradé, phosphite d'alumine, phosphate de fer, phosphate de chaux. Ces formes présentent des tenues variables et une mobilité variable suivant le pH des sols : les formes les plus mobiles sont le phosphate de chaux et le phosphate d'alumine qui prend dans les sols ferrallitiques une très grande importance. Des analyses de phosphore total faite au Niger, au Sénégal, en Haute-Volta, en RCT à Madagascar et à la Réunion, sur des sols goëch-méridionaux différents donnaient des tenues de ppm allant de 20 à 300 ppm en allant du plus acide au plus basique, S BOUYER (1971). D'autres auteurs Robertson, CHIANI C.T., Gupta et al (1971) en appliquant des engrais aux sols tropicaux constataient une augmentation de P total provenant de PFe, Pca et PAl après 8, 11 ans.

La plupart des travaux ont été réalisés en Afrique de l'est, de l'ouest, en Inde et principalement au Nigeria, à Madagascar, à Cuba et en Amérique latine.

En Inde TYAGI B. et DAS N.K (1970) établissent que l'adsorption augmente avec le rapport sol / solution du sel jusqu'à un certain rapport 1/5 ; au delà, l'adsorption diminue à mesure qu'augmente le rapport ; au rapport 1/1, l'adsorption est pour une grande partie due à Fe_2O_3 et aux rapports plus élevés, elle est due surtout aux colloïdes organiques : il conclut que pour cette raison, l'apport d'eau irriguée peut réduire la fixation de P par Fe_2O_3 et favoriser celle due aux colloïdes organiques. Teal (1973) étudie l'adsorption de P dans des oxisols de savane humide et déduit une corrélation avec les

les quantités d'oxydes amorphes de Al, la teneur en argile et en matière organique. Le travail de AGBOLA (1975) dans une région sèche de zone tropicale a montré que la majeure partie de P extractible n'était pas retenue par l'argile du sol et qu'il y avait une corrélation entre la matière organique du sol, P extractible et C.E.C. Au Kenya NINGA (1973) donne des résultats de corrélation entre l'adsorption de P et les propriétés du sol, lui permettant de conclure que Al_2O_3 extractible était le meilleur indice d'adsorption de P et est plus important que Fe_2O_3 . En 1975, DOSSOU au TOGO, conclue que le phosphore tricalcique naturels du TOGO avaient un effet identique aux phosphates monocalciques dans les régions de Savane et de Kaya à développement agricole limité par carence de phosphore. UDO E. J. (1972, 1977) étudie les formes de P et la forme de capacité d'échange cationique par P: elles se répartissent, comme suit P solide > P résiduel > P-Fe > P occlus > P-Al > P Ca : P organique représente 50% dans la plupart des cas, donc constitue une réserve importante. Il montre que l'adsorption de P ou P actionne d'une augmentation de C.E.C., mais que l'augmentation ne serait pas suffisante pour produire une amélioration suffisante du sol MOKUNYE W. (1975), ADEPOJU et COOY 1977. travaillant sur des sols du Nigeria, mettent en évidence l'influence du pH sur l'adsorption de sols de P du Nigeria (en zone de Savane). - ils concluent qu'un programme de chaulage dans la zone de savane doit tenir compte des doses accrues d'engrais P nécessaires pour une nutrition correcte. Bien d'autres auteurs ont abordé dans le même sens.

En 1980, J. C Fardreau discute du choix de la fertilisation phosphorique des sols tropicaux: " En présence d'un sol présentant des signes de carence en phosphore, l'analyse des cinétiques de dilution isotopique des ions phosphates -- permet quelle que soit l'origine pédologique de l'échantillon de préconiser ou d'exclure la pratique de la fertilisation de redressement -- certain auteurs estiment que la méthode isotopique ne peut remplacer en routine les extractions chimiques traditionnelle du fait de la difficulté de mise en oeuvre et donc de son prix de revient, nous pensons au contraire que le prix d'une telle analyse ne doit être comparé qu'à celui d'une fertilisation inutile à court terme (effet immédiat) ou moyen terme (effet enrichissement du sol.).

En conclusion, les études à caractère appliqué, si elles ont des impacts localement, elles ne sont pas toujours bien définies pour avoir une extension plus importante; de plus, par rapport à l'étendue des terres riches en sesquioxides, ce qui est accompli jusqu'à nos jours semble modeste.

Conclusion générale.

Sur le plan bibliographique, le sujet est relativement exploité. On commence à s'intéresser vraiment à la fixation du phosphore dans les sols tropicaux à partir des années 1956 et 1958 (B. DABIN et S. Bouyer). Mais c'est surtout à partir des années 1970, jusqu'à nos jours - qu'un plus grand nombre d'auteurs d'origine diverse s'intéressent au problème (du moins par rapport à l'ensemble de la bibliographie consultée).

Des résultats importants ont été obtenus dans la fixation du phosphore dans les sols; mais des problèmes subsistent toujours: c'est ainsi que les discussions ont surtout porté sur la validité des méthodes de dosage du phosphore, quand on sait que les quantités sont souvent minimales dans les sols; le problème du phosphore assimilable: quelle méthode utilisée? isotopique ou chimique? laquelle traduit exactement ce dont la plante exporte? Là dessus, tous les auteurs ne sont pas d'accord. Les données d'analyse de phosphore ne peuvent pas être isolées des facteurs physico-chimiques des sols, comme il est apparu tout au long des chapitres précédents; il faudrait tenir compte de cela dans les recherches ultérieures. Le gros problème, c'est d'améliorer la fertilité phosphorique de ces sols, mais pour le faire, il faut apporter des engrais et de la matière organique à dose définie d'où pour cela il faudrait connaître la déviation de cet apport d'où on sera amené à établir des expérimentations à long terme.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE consultée

145

- ADEPETU J.A et Corey. B - 1977 : Variation de la disponibilité de N et de P et des fractions de P en sol d'Iwo au Nigeria, cultivé intensément. Plant and soil 46, 303-16 (En).
- AGBOLA. AA et OKO, B. - 1975 : Rapport entre la matière organique du sol et différents réactifs d'extraction de P en rizière sèche de zone ~~humide~~ tropicale. Agron. Abst. Amer. Soc. Agron 145 (En)
- AHMED. B et ISLAM A. - 1975 : Rapport entre P extractible et les formes de P dans quelques sols tropicaux humides. Trop. Agric 52, 2 113-8 (En).
- BAR YOSEFB. et KAFKAFI V. - 1976 : Description de P à partir de suspensions de kaolinite. Agron. Abst. Amer. Soc. Agron, 126
- BAR YOSEF B et KAFKAFI - 1978 : Description de P à partir de suspensions de kaolinite. Soil sci. Soc. Am J. 42, 4, 570-4 (En)
- BARROW N.J. - 1978 : Description des courbes de l'adsorption de P J. Soil sci - 29, 467-62 (En)
- BASU, SN et al - 1972. Solubilité des phosphates appliqués à un sol saturé en P. J. Indian Soc. Soil sci. 20-1-7-11 (En)
- BHATTN.T et MOHAPATRA A.R. - 1978 : Accroissement de la mobilité de P en sol latéritique par apport de MO. - J plant. Crop. 6, 2 57-60 (Abstr. Trop. Agric, 1980 2825T.)
- BIDAPPA C.C et al - 1978 : Dynamique de transformation de P dans des sols latéritiques du Mysore. Mysore J. Agric. Sci 12, 91, 4 (En)
- Bohn H.L. et PEECH M. - 1969 : Complexes phosphato ferriques (III) et phosphato aluminiques en solution dilués (R) - Soil sci. Soc. Amer. Proc. 33, 6. 873-6
- Bonneau M. et Souchier B. 1979 : Constituants et propriétés des sols Précis de Pédologie T.II. Masson pp. 397-400
- Bouyer S. 1971 : Etude sur la fertilisation phosphatée des sols en Afrique Tropicale et à Madagascar. - phosphore et Agricul. revue n° 57. P. 1.

- Brooks, E. - 1973 : Rapport entre la matière organique et P du sol sous forêt tropicale. Plant & Soil, 33-165-8 (En)
- CABRERA F. et al - 1977 : Adsorption de P par différents oxydes : traitement théoriques de l'enveloppe d'adsorption. J Soil Sci, 28, 306-13 (En)
- CABRERA F. et al. 1977 : Isothermes d'adsorption et cinétiques de l'adsorption de phosphate par des oxydes de Fe, de Al, de Cu, de Mn et de Ti. Anales - Edaf. J. Agrobiol., 847-58 (Es, en)
- CHIANG C.T. et YANG C.C. - 1968 : Relation entre les éléments nutritifs et le métabolisme des sols. 1- Etude sur la solubilité de P et le métabolisme en sol de rizière. - Soils et Ferti. TAIWAN 53-4.
- DABIN B. 1963. : Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux : les formes de phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. Cahiers ORSTOM 1963 n°3. pp 27-29.
- DABIN B. - 1964 : Etude des formes du phosphore dans quelques sols des Antilles : action sur l'alimentation phosphatée de la canne à sucre. - Cahiers ORSTOM Pédol. Vol II Fasc 2 pp 5-7.
- DABIN B. 1967 : Colloque sur la fertilité des sols tropicaux Tananarive, Madagascar Tome I pp. 99-115.
- DABIN B. 1970 : Méthodes d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux (suite et fin) - Coton et Fibres trop. Vol XXV Fasc. 3 P.B. 79 PP 289, 306, 307.
- DABIN B. : 1974 : Evolution des phosphates en sels acides des régions tropicales : sciences du sol. 2-87-104 (Fr, En)
- DALAL, R.C. - 1974 : Description de P du sol par une résine échangeuse d'anions. Com. in. Soil Sci plant Anal 5, 6 1531-8 (En)
- De Aramburi P et Madrid L. - 1971 : Réaction des oxydes de fer et de Al avec le phosphate monocalcique monohydraté. An. Edaf. Agrobiol. XXX, 11-12. 1071-81 (Es, En)
- De Aramburi P. 1971. Réaction des oxydes de fer et de Al avec le phosphate dicalcique dihydraté. Anal. Edaf. Agrobiol. XXX 11-12, 1083-94 (Es, En)

Dossou, N E Cretenet M.: 1975 : Phosphates naturels tricalciques
 de TOGO en culture, cotonnière : bilan de 2 essais
 pluriannuels. Trop, Vol xxx fasc. 2 (En, En)

FARDEAU J.C., JAPPE J. - 1980 Choix de la fertilisation
 phosphorique des sols tropicaux : Emploi du phosphore 32
 Agronomie Tropicale XXVI 3, 285.

FARIA C.M.B DE et al - 1976 : Fixation de P dans cinq latosols
 rouge-noir de l'Etat de Minas Gerais : influence de
 quelques facteurs. Rev, ceres 23, 166-79 (Pt, en).

Fox R.L et al - 1971 : Adsorption de P et de S dans les latosols
 Ind. Symp. Soil Fert. Council, New Delhi (Inde) 857-64

Fox R.L. et SEARLE P.G.E. 1977. Fixation de P et S par les
 sols des tropiques - Agron Abstr. Annual Meetings, A.S.A
 Los Angeles NOV 77, 43 (En).

FONDORA O et al - 1977 : Mouvement de P dans 3 sols de Cuba
 Centro Agricola, 1975, 2, 1, 33, 9 (ES, en), Soil et Fert
 1977 10, n° 56 11).

FYFE W.S. et al - 1978 : liberation de P_i par les acides
 Synthétiques et empêchement de la fixation de P sur
 l'hydroxyde ferrique - Soil Sci-plant Nutr 24, 4, 455-64
 (En)

GUPTA S.K et al : 1971. le devenir de P appliqué à
 - quelques sols du Madhya Pradesh - J. Agric Sci - Indian
 41 - 2. 125 - 30

HARTER R.D. et FOSTER B.B. 1976. Simulation sur ordinateur
 - du déplacement de P dans les sols - Soil Sci - Soc Amer
 Proc. 40, 239-42 (En)

HEGLYAR K.R. et al - 1976. Adsorption de P₀₄ par la
 gibbsite - I. Effet des chlorures neutres de Ca, Mg
 Na et K - J. Soil - Sci. 27, 307-14 (En)

HEGLYAR et al : 1976 : Adsorption de P₀₄ par la gibbsite
 II - Formation de complexes superficiels comportant
 des cations divalents - J. Soil Sci - 27, 315-23
 (En)

- HERNANDEZ, D.L. 1974. Isothermes de désorption de P. dans
 usols tropicaux choisis et un sol tempéré -
 Commun. Soil. Sci Plant Anal. 5, 3-145-54 (En)
- HINGA, G. 1973 : Influence des propriétés des différents types
 de sols du Kenya sur la puissance d'adsorption de P
 East Afric. Agro. Forest J. 38, 4 - 600-4 (En)
- HOPE G.D & SYERS J.K. 1976 : Effet du rapport solution
 - sol sur l'adsorption de P. dans les sols
 J. Soil Sci, 27, 301-6 (En)
- HUBBARD, E.A et WALMSLEY : & 1974 : Etude de la fixation
 - tion de P. dans des sols de bauxite à la Jamaïque
 Tropic. Agric - 51, 3, 361-9 (En)
- HUBBARD, G.A. et W.D. 1974 : Etude de la fixation de P
 et de sa libération dans des sols de bauxite à la
 Jamaïque - II - libération de P
- JOO, A.S.R et FOX R.L 1977 : Caractéristique de fixation
 de P dans quelques sols de terres d'Afrique de
 l'Ouest. Soil Sci 124, 6, 370-6 (En)
- KAR, A. et al. 1969 : Assimilabilité et fixation du phosphate
 - appliqué dans quelques sols acides de l'Inde
 J. Indian Soc. Soil. Sci - 17, 49-7.
- Khanna S.C et Mahajan K.K. 1971 : Etude du comportement
 des phosphates apportés à des sols ayant des propriétés
 physico-chimiques différents. Int. Symp Soil Ferti
 Eval, New Delhi (Inde) 725-36.
- Kingho T. et al 1978 : Relation entre la rétention
 de l'ammoniac et la quantité de P adsorbé dans
 les laterals. Rev Agricltura, 53. 1-2 - 27-33
 (Pt) Abstr Trop. Agric 1979, 5-4 no 24501
- Kuo, S., LOTSE, E.G. 1973. Cinétique de l'adsorption
 et de désorption de P par l'hématite et la gibbsite.
 Soil Sci - 116, 6 - 400-6 (En)
- LEAL, J.R et VELLOSO, A.C.X. 1973 : Adsorption de P dans
 dans des oxisols de savane humide. Pesqui.
 Agropecuar. Brasil. Ser. Agr. 8, 7 - 81-8

LOPEZ - HERNANDEZ D. et BURNHAM. CP. 1974 : Covariance
de l'adsorption de P avec d'autres propriétés du sol
dans quelques sols britanniques et tropicaux
J. Soil Sci. - 25, 2 - 196-206 (En)

LOPEZ HERNANDEZ et BURNHAM C.P. : 1974 : Effet du pH sur
l'adsorption des phosphates dans le sol.
J. Soil Sci - 25, 2 - 207-16 (En)

MADRID L. et POSNER A.M. : 1973 - Description de P à partir
de la kaolinite goethite J. Soil Sci, - 30 - 697-707
(En)

Mc. LAVGHIN J.R. et al. 1977 - Mise au point et évaluation
d'un modèle cinétique pour décrire l'adsorption de
P par un gel d'oxyde de Fe-hydraté : Geoderma
18, 4 - 295-307 (En)

MISRA, S.G. et GUPTA B.P. 1974 : Distribution de P ajoutée
aux sols sous l'influence des ions de Fe³⁺ et Al³⁺
Ann. INIA, Série General n°1 - 201-7

MISRA, S.G. GUPTA B.P. 1975 : Effet des substances complexan-
tes sur la migration de P dans des colonnes
de sol. Soil et Ferti - 38 n° 4481.

MO KWUNYE U. 1975 : Influence du pH sur l'adsorption de
P par les sols des zones de Savane de Guinée
et du Soudan au NIGERIA. - Soil Sci Soc Amer
Proc. 39, 6, 11002 (En)

MOKWUNYE U. 1977 : les engrais P dans les sols de sa-
vane au NIGERIA. 1) Utilisation des isothermes
de fixation de P pour estimer le besoin en P de
maïs à SAHARU. Trop. Agric (Trinidad et Tobago)
54, 3, 265, 71 (En)

MUJIBU D et POSNER AM et QUICK. 1966 : Mécanismes
de l'adsorption des ions phosphoriques sur la ka-
olinite, la gibbsite et la pseudobrookite.
I. Isothermes et effet du pH sur l'adsorption
J. Soil Science - 17, 212 - 29 - 171 2/60

MULJADI D. POSNER AM. et QUIRK. 1966

II) Position des sites d'adsorption - J.S. Sci. 17-230-7.

MULJADI D. POSNER et POSNER AM. et QUIRK. 1966 :

III) Effet de la température sur l'adsorption. J.S. Sci. 238-47

NAGARAJAH S. POSNER AM. et QUIRK J.P. 1970 : Concurrence entre les phosphates et le polygalacturonate ou d'autres anions organiques du point de vue adsorption en surface sur la kaolinite et les oxydes. - Nature, Lond, 228, 83-5

NOVAK L.P. & ADRIANO D.C. 1975 : Mouvement de P dans le sol : Cinétique de la réaction Sol orthophosphate.

J. Environ. qual. ; 4, 2 261-6 (En)

P. ANAND. et al. 1978 : Mouvement et rétention de P dans des caottes de sol latéritique. J Indian Soil Sci, 26-1-25-32 (En)

PARFITT R.L. et al. 1975 : Mécanismes de fixation de P par les oxydes de fer. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39, 837-41 (En)

PARFITT R.L. 1977. Soil Adsorption de P sur un oxisol Soil Sci Soc. Amer. J. 41, 1064-7 (En)

PEINEMANN N. et al. 1978 : Influence de quelques chélates de Al sur l'adsorption de phosphate par les oxydes de Al hydratés. Z. Pflanz - Bodenk. 114, 479-86 (En, de)

PERRON, K.W. 1975 : Adsorption de P par différents types d'hydroxydes de Al et Fe (III) sur des surfaces de mica. - TVA Fert. A-bst. 8, 1 n° 124.

PLESSIS S.F. et T. BORGES R. 1966 : Disponibilité de différentes fractions de phosphate. S. Afr. J. Agric Sci. 9-33 - 40 5 tabl. (R)

POSNER AM. et al. 1980. : Isothermes d'adsorption : doit-on les fractionner ? J. Soil Sci. 32, 1-10 (En)

QUIROS S. et al. 1980. Neutralisation de Al échangeable et prélèvement de P dans 3 sols du Costa Rica. Soil & Fert. 559 2 (ES. en)

RAJAN S.S et FOX R.L. 1975: Adsorption de P par les sols 18
II - Réaction dans les sols tropicaux acides, Soil Sci Soc
Amer. Proc 39, 837-41. (En)

Rep. Farming Syst Prog. I.I. TA. Ibadan 1972: Capacité
d'échange cationique et adsorption de P (En) 25-8

Rep. Farming Syst Prog. I.I. TA. Ibadan 1972: Forme
de P dans les sols choisis du NIGERIA - 31-2 (En)

Robertson W.K. et THOMPSON L. 1966: Disponibilité et
fractionnement du phosphore résiduel dans des
sols riches en aluminium et en fer. - Soil Sci Soc Amer
Proc. 30, 446-50 (10 tableaux) (R).

Ryden J.C. et al 1976: Retention de Ca résultant de l'ad-
sorption de P par les sols pauvres Soil Sci Soc Amer. J.
40, 845-6 (En)

Ryden J.C. et al. 1977: Adsorption de P en fonction
du temps par les sols et les oxydes de fer hydratés
J. Soil Sci, 28, 585-95 (En)

Ryden J.C. et al. 1977: Relation entre l'adsorption et
l'échange isotopique de P adsorbé par les sols et
le gel d'oxyde de fer hydraté. J-Soil Sci 1977
28, 596-609 (En)

Ryden J.C. et al. 1977: Mécanismes de fixation de P par
les sols et par un gel d'oxyde ferrique hydraté.
J-Soil Sci, 28, 72-92. (En)

SANTANA S.P. et al. 1978: Etude de des sols provenant
du Triangulo Mineiro et de Viçosa: Adsorption de
P. revista Ceres 1978 - 27-140-32-10 (R, en)

Sinha H.K. 1977: Phosphates organo métalliques
II - caractéristique physico-chimique des mélanges
phosphates métalliques acides humiques et
fulvique. Plant et Soil - 35, 485-193 (En)

Sinha H.K. 1977: Phosphate organo métallique - I. Inter-
action de complexes phosphates avec des
substances humiques. Plant & Soil 35-471-84
(En)

SREE RANOW U.S et PRATT P.F. 1970 : Influence de la teneur en oxygène
de fer sur la dissolution du phosphate bicalcique
Soil Sci - 109-1-35-9.

SRIVASTA O.P. et al. 1972: Dynamique de P ajoutés à certains
sols de l'UP. J. Indian Soil Sci 20-2-103-9 (En)

STOYANOVA. E. POUSHKAROV. N. 1975.: Cinétique de la libération
de P par les sols. Sci. Agrochim. 10.-1-61-7
(Rv, en).

TYAGI B.K et DAS N.K. 1970.: Réaction de P ajoutés à des
sols d'une région submontagnaise de l'Utter Pradesh
Indian J. Agric. Sci, 10 - 372-42

UDO, E.J. et UZU.FO. 1972 : Caractéristiques de l'adsorption
de P dans quelques sols du Nigeria (Soil Sci Soc. Proc
36-879-83 (En))

UDO, E.J. 1977 : Formes et distribution de P dans 3 sols du
Nigeria suivant une toposéquence: Trop. Agric
(Trinidad et Tobago.) 1977, 154, 2, 149-56 (En)

URIYO AP et KESSERA. 1979: Etude de P en Tanzanie :
Evaluation de différentes méthodes d'extraction de
P assimilable pour les plantes dans un oxisol
Soils and Fertil. 64-28.

UZU, FO et al. 1975: Formes de P dans quelques sols cul-
tivés importants du Nigeria - Soil Sci, 1975-120
3-218-8 (En)

VIJAYA. CHANDRAN, P.K. et HARTER. 1975 : Détermination
de l'adsorption de P dans une série de types de sol
Soil Sci - 119, 2, 119-26 (En)

WEAVER R.H. et al. 1975: Formes de P organiques et minérales
dans quelques sols fortement altérés de Porto Rico
Trop. Agric, 52-2-119-30 (En)

WILLIAMS B.G. et PATRICK 1973: Dissolution des phosphates
ferriques complexes dans des conditions de Eh et
pH contrôlés. Soil Sci. Soc. Amer. Proc.
37-33-6 (En)

- S. BOUYER-1958 - Corrélation entre les résultats culturaux et les teneurs en phosphore du sol dans le cas des sols ferrugineux du Sénégal. C. R. Comm. II et III de l'A.I.S.S. Hambourg Vol. 2, p. 244.
- CHANG, S. C., and M. L. JACKSON. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. Oxford 12 (2): 286-293.
- CHANG S. C. and W. K. CHU. 1961. The fate of soluble phosphate applied to soil. J. Soil Sci. Oxford 12 (2): 286-293.
- CHANG, S. C. and S. R. JUO. 1963. Available phosphorus in relation to forms of phosphate in soil. Soil Sci. 95 (2): 91-95.
- DABIN B. 1956. Interprétation agronomique des analyses de sols: les particules de l'azote et du phosphore. Congr. Int. Sci. Sol D (6): 403-405. PARIS
- GACHON, L. 1969. Les méthodes d'appréciation de la fertilité phosphorique des sols.
- ASR. JUO. and R. L. FOX 1977. Description, characteristics of some Bench Mark Soils in West Africa, Soil Sci 124 (6)
- KANWAR, B. B. and B. R. TRIPATHI. 1977 - Evaluation of P contributing to available P extracted by some common soil test method. J. Indian Soc. Soil Sci. 25 (2)
- LE BUANEZ B. 1973: Contribution à l'étude de la carence en phosphore des sols sur granite en Côte d'Ivoire - Thesis Faculty of Science, Abidjan 130p.
- Olivier, R. 1972 - Etude du statut phosphorique des sols de Madagascar. 3ème partie IRAT Madagascar Rapp. Rech. Sci 1971 Doc. 313.
- Olson, S. R. and F. S. WATANABE. 1970. Diffusive supply of phosphorus in relation to soils texture variations. Soil Sci. 110. 318 - 327.
- R. K. Schofield: 1955. Can a precise meaning be given to "available" soil phosphorus. Soil Fert. 28: 373-375.