

ASSOCIATION INTERNATIONALE DES FABRICANTS DE SUPERPHOSPHATE  
INTERNATIONAL SUPERPHOSPHATE MANUFACTURERS' ASSOCIATION

COMITÉ AGRONOMIQUE, PARIS  
AGRICULTURAL COMMITTEE, PARIS

(Extr. Bull. Docum. N° 27, Mai 1960)

L'ACIDE PHOSPHORIQUE DANS LES SOLS DES RÉGIONS TROPICALES

THE PHOSPHORIC ACID OF THE SOILS OF TROPICAL REGIONS

G. AUBERT (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris) (\*)

Dans cet exposé, seuls seront envisagés les sols bien drainés des régions intertropicales à climat humide ou semi-humide, c'est-à-dire les sols ferrugineux tropicaux et les sols ferrallitiques.

Les sols hydromorphes noirs ou foncés des régions tropicales ou sub-tropicales, appelés « tirs » au Maroc, « regurs » dans l'Inde et « black earth » en Australie, posent des problèmes particuliers du fait de leur extrême pauvreté en acide phosphorique.

Il n'est pas possible de se restreindre à l'acide phosphorique seul, car il y a aussi dans les sols des formes organiques du phosphore. Celles-ci ne seront pas étudiées en tant que formes mêmes du phosphore dans les sols tropicaux, mais plutôt en tant que sources d'acide phosphorique pour les sols tropicaux.

I. — L'ACIDE PHOSPHORIQUE DANS LES MINÉRAUX ET LES ROCHES

Beaucoup de minéraux contiennent de l'acide phosphorique mais il en est un qui est vraiment essentiel, c'est l'apatite.

L'apatite se trouve dans les roches éruptives et dans les roches métamorphiques, parfois dans les granits, dans les pegmatites, beaucoup plus souvent dans les roches de type basique. Les cristaux d'apatite s'y observent en grande quantité, notamment dans les basaltes, les diorites, les gabbros, les diabases, etc.

(\*) Exposé présenté à la 27<sup>me</sup> réunion de la Commission Agronomique Consultative de l'I.S.M.A. tenue à Paris les 16 et 17 février 1960.

In this paper, only the well-drained soils of intertropical regions with wet or semi-wet climate will be discussed, that is, ferruginous tropical soils and ferrallitic soils.

Black or dark hydromorphic soils of tropical or subtropical areas, called « tirs » in Morocco, « regurs » in India, and « black earth » in Australia, exhibit special problems by reason of their extreme poverty in phosphoric acid.

It is impossible to deal with phosphoric acid alone, as organic forms of phosphorus also occur in the soils. These latter will not be treated simply as forms of phosphorus in tropical soils, but rather as a source of phosphoric acid for tropical soils.

I. — PHOSPHORIC ACID IN MINERALS AND ROCKS

Many minerals contain phosphoric acid, but the really important one is apatite.

Apatite occurs in eruptive and in metamorphic rocks, sometimes in granites, in pegmatites, much more often in rocks of the basic type. Apatite crystals may be observed in them in large amounts, particularly in basalts, diorites, gabbros, diabases, etc.

(\*) Talk given at the 27th meeting of the Agricultural Advisory Commission of I.S.M.A. held in Paris, February 16th and 17th, 1960.

O. R. S. T. O. M.  
Collection de Référence

12 1960

n° B11032

Ce minéral, qui se trouve dans les roches mères du sol va, dans les régions tropicales, s'altérer assez vite ; il s'agit pourtant d'un chloro-fluorophosphate tricalcique, très peu soluble pour les chimistes. Mais, pour l'agronome ou le pédologue c'est déjà un minéral soluble, car si à chaque instant, son degré de solubilité est extrêmement faible, la réaction peut se poursuivre sans cesse à condition que les produits de cette dissolution ne viennent pas la bloquer en se maintenant dans le milieu, ce qui arriverait dans un sol hydromorphe. Au bout d'un temps assez long, les cristaux d'apatite finiront par se dissoudre, beaucoup plus vite dans les régions tropicales, et tropicales-humides en particulier, que dans les régions tempérées, par suite des conditions très supérieures de milieu du point de vue dissolution et hydrolyse.

À côté de cette apatite, un autre minéral, est encore assez fréquent, plus complexe, à la fois phosphaté-calciqne et carbonaté-calciqne. Il en existe des variétés diverses, en particulier la dablite et la collophanite qui se trouvent spécialement dans les phosphates de chaux sédimentaires et dans les phosphorites.

On peut enfin signaler un phosphate bicalcique, la brushite.

L'acide phosphorique libéré par les réactions d'hydrolyse ou de dissolution à partir de ces phosphates initiaux peut réagir sur les oxydes et hydroxydes de fer, d'aluminium, de manganèse, etc. et il existe alors toute une série de minéraux secondaires : phosphates de fer et d'aluminium, de fer et de manganèse, d'aluminium et de fer, etc. Les plus fréquents sont : le phosphate de fer dénommé dufrenite, rockbridgite ou vivianite, le phosphate d'aluminium tel que la variscite, le phosphate mixte d'aluminium et de fer, spécialement étudié par certains auteurs américains, en particulier M.L. Jackson, la barrandite.

Enfin, il existe parfois, plutôt du point de vue purement géologique que pédologique, des phosphates complexes de calcium, fer, aluminium.

## II. — LES SOLS BIEN DRAINÉS DES RÉGIONS TROPICALES

La formation des sols dans les régions tropicales est essentiellement dominée par une très forte température et une très forte humidité.

Dans certains de ces sols (ceux des régions tropicales sèches), cette humidité n'est que passa-

This mineral occurring in the parent material of soil becomes very rapidly altered in tropical areas ; to the chemist it is a very slightly soluble tricalcium chloro-fluo-phosphate. However, for the agronomist or pedologist, it is a soluble material since, even though at any moment its solubility is very low, the reaction can continue ceaselessly, provided that the products of this process of solution do not block it by remaining in the medium ; this is in fact what happens in a hydromorphic soil. At the end of a quite long period, the apatite crystals become completely dissolved, much more quickly in tropical regions, and particularly the wet tropics, than in temperate regions, by reason of the more highly favourable conditions for solution and hydrolysis.

In addition to apatite, another mineral occurs, more complex, containing simultaneously forms of calcium phosphate and carbonate. Various forms occur, particularly dablite and collophanite, which occur specially in sedimentary calcium phosphates and in phosphorites.

Finally, a dicalcium phosphate, brushite, should also be mentioned.

The phosphoric acid liberated from these initial phosphates by hydrolysis or solution are able to react with oxides and hydroxides of iron, aluminium, manganese, etc., and thus a whole series of secondary minerals occurs, phosphates of iron and aluminium, phosphates of iron and manganese, of aluminium and iron etc. The most frequent are : the iron phosphate known as dufrenite, rockbridgite or vivianite, the aluminium phosphate variscite, the mixed phosphate of aluminium and iron, which has been studied particularly by American workers, M. L. Jackson in particular, and which is known as barrandite.

Finally, there sometimes occur, more of geological than pedological importance, complex phosphates of calcium, iron and aluminium.

## II. — THE WELL DRAINED SOILS OF TROPICAL AREAS

Soil formation in tropical areas is mainly dominated by very high temperature and very high moisture.

In certain of these soils, the moisture is only ephemeral or seasonal (those of the dry tropics).

gère ou saisonnière. Il en résulte que la décomposition des roches y comporte à la fois les phénomènes de désagrégation et d'altération, avec à peu près autant d'intensité pour les uns que pour les autres. Dans le cas des sols des régions tropicales humides et équatoriales, ceux d'altération, essentiellement chimiques, l'emportent de beaucoup sur ceux de désagrégation, d'ordre surtout physique et mécanique.

Les deux éléments qui caractérisent par conséquent les sols de ces régions tropicales humides sont, d'une part les phénomènes d'hydrolyse extrêmement poussés des minéraux contenus dans ces sols, et, de là, leur richesse en hydroxyde et oxyde de fer, d'alumine, de manganèse, etc., en même temps que leur grande profondeur; d'autre part, sur le plan de l'évolution de la matière organique, une décomposition rapide et généralement totale de la matière végétale, ne laissant plus qu'un résidu humique relativement peu important en quantité, mais assez stable. Il devient particulièrement stable et peut s'accumuler quand le sol est riche en calcium, par exemple dans les sols formés sur roches basaltiques.

On a pris l'habitude, depuis quelques années, de classer les sols des régions tropicales semi-humides, humides, et des régions équatoriales, d'une part en Sols Ferrugineux Tropicaux, où les éléments libérés sont essentiellement les oxydes ou hydroxydes de fer et les oxydes de manganèse, d'autre part en Sols Ferrallitiques, où les éléments libérés sont à la fois oxydes et hydroxydes de fer, de manganèse et d'aluminium.

Pour les pédologues d'origine américaine, l'ensemble des deux correspond aux « latosols ».

### III. — L'ACIDE PHOSPHORIQUE ET SES COMPOSÉS DANS LES SOLS DES RÉGIONS TROPICALES

D'une façon générale, aussi bien dans les régions tempérées que dans les régions tropicales, l'acide phosphorique et les composés de l'acide phosphorique se présentent sous des formes très diverses dans les sols. Mais le problème est encore plus complexe dans les sols des régions tropicales, car les phosphates de fer et d'alumine, qui ne jouent qu'un rôle un peu secondaire dans les régions tempérées, y deviennent l'élément essentiel, avec leurs formes très variées. En outre, le phosphore inclus dans la matière organique se libère beaucoup plus rapi-

Consequently the weathering of the rock here comprises simultaneously processes of disaggregation and decomposition of more or less similar intensity. With the soils of wet tropical regions and the equatorial regions, the processes of decomposition, which are essentially chemical, are more intense than those of disaggregation, which are mainly physical and mechanical.

The two fundamental characteristics therefore, of the soils of these wet tropical areas are, on the one hand, the very intense hydrolytic phenomena, and thus, the richness of the soil in hydroxide and oxide of iron, aluminium, manganese etc., and at the same time their great depth; on the other hand, as regards the evolution of organic matter, the rapid, and generally complete, decomposition of the organic matter, leaving only a relatively insignificant, but quite stable, amount of organic residue. It becomes particularly stable, and can accumulate, when the soil is rich in calcium, for example in soils formed on basaltic rocks.

A custom has grown, over the last few years, of grouping the soils of the wet and semi-wet tropics, and of the equatorial regions, into Tropical Ferruginous Soils, in which the liberated materials are mainly oxides or hydroxides of iron and oxides of manganese, and Ferrallitic Soils, in which the liberated materials are both oxides and hydroxides of iron, manganese and aluminium.

For pedologists of American origin, the two together correspond to « latosols ».

### III. — PHOSPHORIC ACID AND ITS COMPOUNDS IN THE SOILS OF TROPICAL AREAS

In a general way, both in temperate and in tropical areas, phosphoric acid and the compounds of phosphoric acid occur in very diverse forms in soils. But the problem is more complex in the soils of tropical areas. In fact, the phosphates of iron and aluminium, which play only a somewhat secondary role in temperate regions, become in tropical areas the essential component, in their very varied forms. Further, the phosphorus included in the organic matter is liberated much more rapidly into phosphoric acid and into mineral forms of phosphate in tro-

dement en acide phosphorique et en phosphate minéral dans les sols des régions tropicales que dans ceux des régions tempérées ; dans les premiers il devient donc indispensable d'en tenir compte.

### *Le phosphore de la matière organique*

Lorsque l'on étudie les sols des régions tropicales, il est nécessaire de tenir compte non seulement de l'humus qui s'y trouve, mais également de toute la matière organique et de la partie de matière végétale qui va se décomposer sans donner d'humus. Son importance peut, en effet, apparaître comme plus grande dans l'évolution des sols tropicaux que celle de l'humus stable qui s'y forme.

Il convient donc d'y avoir une conception plus dynamique du rôle de la matière organique.

Dans les sols des régions tropicales humides et équatoriales, les éléments minéraux entrent dans le cycle évolutif du sol et faisant vivre les plantes qui en dépendent sont essentiellement ceux qui circulent sans cesse entre le sol, le sous-sol, les végétaux, puis la litière qui se décompose et ainsi de suite.

Cette conception de l'évolution des éléments minéraux dans ces sols tropicaux paraît valable, quoique à un moindre degré, pour les éléments phosphatés. En effet, les 12 à 15 tonnes de matières sèches qui sont chaque année déposées sur chaque hectare par la grande forêt et décomposées apportent au sol de 10 à 25 kg/ha de  $P_2O_5$ . Cet acide phosphorique est immédiatement soluble et utilisable le cas échéant ; par rapport aux réserves d'acide phosphorique facilement utilisable de ces sols, cette quantité, si minime qu'elle puisse paraître, présente déjà une réelle importance.

Cet acide phosphorique tend à être fixé dans l'horizon supérieur du sol. Ceci a été montré par plusieurs auteurs et les chiffres que l'on obtient jour après jour dans les études des régions tropicales humides et équatoriales le prouvent abondamment, chaque fois qu'il s'agit d'un sol forestier non dégradé. La teneur en acide phosphorique total est ainsi, au Gabon, de 0,9 ‰ dans l'horizon supérieur (dix premiers cm), 0,6 ‰ en dessous, d'un sol ferrallitique sur diorite, 0,5 ‰ en surface (de 0 à 10 cm) et 0,25 en dessous dans un autre sol ferrallitique sur granit.

Certains chercheurs, en particulier J. Forestier, en République Centre Africaine, admettent que c'est même surtout dans les cinq premiers cm que la fixation de cet acide phosphorique se fait.

pical than in temperate soils and must therefore be taken into account in the case of tropical soils.

### *Phosphorus of the organic matter*

When investigating tropical soils it is necessary to take into account not only the humus present, but also the whole of the organic matter, and that part of the plant material destined to decompose without humus formation. Its effect may in fact be greater in the development of tropical soils than the effect of the stable humus formed.

It is therefore necessary here to have a more dynamic conception of the role of organic matter.

In the soils of the wet tropical and equatorial regions, the mineral nutrients which enter the developmental cycle of the soil, and are essential to the life of the plants on it, are essentially those which circulate ceaselessly between the soil, the subsoil, the plants, and then the litter which decomposes and so on again.

This concept of the developmental cycle of the mineral nutrients in tropical soils appears to hold, although to a lesser degree, for the phosphate nutrients. In actual fact, the 12 to 15 tons/ha of dry matter deposited each year by high forest and decomposed bring from 10 to 25 kg/ha of  $P_2O_5$ . This phosphoric acid is immediately soluble and utilisable if needed ; in comparison with the reserves of easily assimilable phosphoric acid of these soils, this amount, small though it may appear, is yet of real importance.

This phosphoric acid tends to become fixed in the upper horizon of the soil. This has been shown by several workers, and the figures which are obtained almost daily in studies of the wet tropical and equatorial regions prove it abundantly, whenever a non-degraded forest soil is concerned. The content of total phosphoric acid in Gabon is thus 0.9‰ in the upper horizon of a ferrallitic soil on diorite, and 0.6‰ below ; 0.5‰ in the surface soil (0-10 cm) and 0.25‰ below in another ferrallitic soil on granite.

Some workers, particularly Forestier, in the Centrafrican Republic, accept that the fixation of this phosphoric acid occurs mainly in the upper 5 cm.

### *Le phosphore provenant de la décomposition des minéraux*

La décomposition des minéraux est beaucoup plus rapide dans les régions tropicales que dans les régions tempérées.

Dans ces dernières, on évalue la fertilité des sols en déterminant au laboratoire, par la méthode jugée la meilleure, les éléments facilement extractibles. Dans les régions tropicales humides et équatoriales, il peut être utile de déterminer cette première fraction, mais nous avons toujours besoin, pour juger de la fertilité d'un sol, de connaître ce que l'on nomme ses réserves minérales.

Au cours des phénomènes de décomposition, l'acide phosphorique provenant des minéraux tend à être solubilisé et passe dans la solution du sol. Une partie est absorbée immédiatement par les plantes, une autre partie tend à être insolubilisée sous forme de phosphates de fer, d'alumine ou de phosphates complexes et, comme cela a été montré récemment par M.L. Jackson, sous forme de phosphates inclus dans un revêtement ferrugineux.

Cette notion de revêtement ferrugineux est extrêmement intéressante, car nous avons eu souvent l'occasion d'observer le même fait sur un plan plus pédologique. Des minéraux qui s'altèrent très vite en région tempérée, comme le mica noir par exemple, ne peuvent parvenir à s'altérer complètement dans certains sols des régions tropicales. En effet, l'hydroxyde de fer libéré dans une première phase de décomposition vient les enrober d'un revêtement très résistant à l'altération et qui les protège ainsi contre toute décomposition ultérieure. M.L. Jackson et S.C. Chang ont montré que le même phénomène s'observe dans l'évolution des minéraux phosphatés, dont l'élément fondamental libéré peut ensuite être inclus dans une « gangue » protectrice.

### *Le phosphore lié aux argiles*

Il semble bien que la plus grande partie du phosphate lié aux argiles le soit par les surfaces des éléments argileux, surfaces externes certainement, probablement aussi certaines faces internes des réseaux. Nous trouvons là les idées auxquelles Barbier est arrivé à la suite de ses travaux au moyen de  $P^{32}$  sur les dilutions isotopiques dans les sols et sur l'évolution des phosphates au contact des sols.

C'est essentiellement par l'intermédiaire des ions échangeables que l'acide phosphorique est

### *Phosphorus derived from the decomposition of minerals*

The decomposition of minerals proceeds much faster in tropical than in temperate regions.

In the latter, soil fertility is evaluated in the laboratory by determining the easily extractible nutrients by the method considered the most appropriate. In the wet tropical and equatorial regions it can be of use to determine the extractible nutrients, but it is always necessary, in judging the fertility of a soil, to know the mineral reserves.

During the phenomena of decomposition, the phosphoric acid derived from minerals tends to become dissolved, and passes into the soil solution. A proportion is immediately absorbed by plants, another tends to pass out of solution in the form of phosphates of iron or aluminium, or of complex phosphates, and, as has been recently shown by M. L. Jackson, in the form of phosphates within a ferruginous coating.

This notion of ferruginous coating is extremely interesting, for one has often observed the same thing pedologically. Minerals which, in temperate regions, decompose very rapidly, as black mica for example, do not reach complete decomposition in certain soils of tropical regions. In fact, iron hydroxide, liberated in the first phase of decomposition, invests them with a covering very resistant to alteration, and thus protects them from any further decomposition. M. L. Jackson and S. C. Chang have shown that the same phenomenon occurs in the evolution of mineral phosphate, the fundamental element of which is enclosed, after liberation, within a protective « gangue ».

### *Phosphorus bound to clays*

It appears that the greater proportion of the phosphate bound to clays is bound by the surfaces of the clay particles, certainly the external surfaces, and probably also some internal faces of the lattices. We find here the ideas reached by Barbier after his work with  $P^{32}$  on isotopic dilution in soils and on the evolution of phosphates in contact with soils.

Phosphate is bound to clays mainly by the intervention of exchangeable ions. In temperate

lié aux argiles. En pays tempéré, l'ion échangeable le plus important dans ce cas est le calcium. Il joue encore un rôle dans les sols des régions tropicales, mais beaucoup plus faible. Le fer et l'aluminium échangeables interviennent aussi. Lorsque le sol est particulièrement acide, pour des pH de 4,5 ou 4, la proportion d'aluminium échangeable est fort importante et peut par conséquent donner naissance à une fixation assez forte d'acide phosphorique sur les argiles.

Il est certain que, d'après les expériences agricoles faites, l'acide phosphorique lié aux argiles par l'intermédiaire du calcium est beaucoup plus facilement utilisable par les plantes que l'acide phosphorique lié par l'intermédiaire de l'aluminium. Cela explique pourquoi, lorsque l'on étudie les sols des régions tropicales humides acides (pH 5 ou 5,5, peut-être même 6), on a l'habitude d'utiliser, comme élément permettant d'évaluer la quantité d'acide phosphorique à la disposition des plantes dans ces sols, leur teneur en acide phosphorique total, mais on ne juge de cette teneur qu'en fonction de la saturation du complexe absorbant en Ca échangeable. C'est une méthode utilisée dans beaucoup de pays, en Afrique du Sud en particulier, à la suite des travaux d'E.G. Williams, en Angola également et dans les territoires d'influence française.

Certains problèmes subsistent quant à la liaison de l'acide phosphorique à l'argile, en particulier celui de savoir si les phénomènes sont identiques quel que soit le type d'argile.

De toute manière, cette liaison existe et a été démontrée par divers auteurs, par exemple par J.B. Hemmoll dans le cas de la kaolinite, argile constituant 90%, peut-être davantage, de la fraction argileuse des sols des régions tropicales. Il n'est pas sûr que cette liaison soit seulement une liaison d'adsorption ou peut-être une formation de composés intermédiaires, tels que la variscite, comme Hemmoll l'a souligné.

#### *Le phosphate de calcium sous ses différentes formes*

On trouve en effet des formes de type intermédiaire, monocalcique, bicalcique en particulier, et octacalcique.

Ces formes se retrouvent surtout dans les sols alcalins, beaucoup moins dans les sols acides, car elles sont solubles en milieu acide. Pour les sols que nous étudions aujourd'hui, c'est surtout dans certains sols ferrugineux tro-

regions, the most important exchangeable ion in this connexion is calcium. It still plays a part, but a much weaker one, in the soils of tropical regions. Exchangeable iron and aluminium also intervene. When the soil is particularly acid, of pH 4.5 or 4, the proportion of exchangeable aluminium is very large, and can therefore give rise to a quite intense fixation of phosphoric acid on clays.

It is clear from agricultural experiments that the phosphoric acid bound to clay by the action of calcium is much more easily utilised by plants than is the phosphoric acid bound by the action of aluminium. This explains why, in studying the acid soils of the wet tropics (pH 5 or 5.5, perhaps even 6) it is customary to use their total phosphoric acid content as the value enabling assessment of the quantity of phosphoric acid available to plants in these soils, but this content is so used only in relationship with the saturation of the absorbing complex by exchangeable Ca. It is a method used in many countries, particularly in South Africa, as a result of E.G. William's work, and also in Angola and in the territories under French influence.

Some problems remain in respect of the binding of phosphoric acid to clay, in particular that of whether the phenomena are identical whatever the type of clay.

However, this binding exists and has been shown by various workers, for example by J. B. Hemmoll working with kaolinite, a clay constituting 90% and perhaps more of the clay fraction of the soils of tropical regions. It is not certain whether this binding is only a binding by adsorption, or whether there is perhaps a formation of intermediary compounds, such as variscite, as Hemmoll has stressed.

#### *Calcium phosphate in its different forms*

Forms of intermediate type do in fact occur, monocalcium, dicalcium in particular, and octocalcium.

These forms occur particularly in alkaline soils, and to a much smaller extent in acid soils, since they are soluble in acid medium. As regards the soils with which this paper is concerned, it is mainly in certain slightly leached tropical fer-

picaux, peu lessivés, que l'on peut avoir des chances de trouver ces formes de phosphate calcique.

La partie essentielle et la plus facilement attaquable est soluble dans les acides dilués, surtout dans l'acide citrique ou l'acide oxalique. Ces acides peuvent dissoudre aussi certaines formes de phosphore liées à la matière organique et de phosphate liés aux argiles, ainsi que certaines formes de phosphate de fer (W. D. Bishop et S. A. Barber). C'est pourquoi cette méthode peut probablement être encore utilisée par certains auteurs, pour juger de la réserve en acide phosphorique assimilable dans les sols de type ferrugineux tropicaux pas trop lessivés et dont la teneur en fer libre reste relativement faible. C'est probablement la limite de l'utilisation de cette méthode, car toutes les formes qui seront examinées par la suite ne sont pas suffisamment solubles dans ce réactif et l'essentiel des phosphates contenus dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés ou dans les sols ferrallitiques.

#### *Les phosphates de fer et les phosphates d'alumine*

Il s'agit probablement de phosphates de fer hydraté du type de la dufrénite ou, en littérature anglaise, rockbridgite (C.V. Fife). Ces phosphates peuvent être solubilisés par des solutions alcalines, comme la soude 0,1 N, réactif d'extraction souvent employé, en particulier à la suite des travaux de D. H. Saunder. Elles sont aussi légèrement solubles en solution acide.

Ils résultent de la réaction de l'acide phosphorique solubilisé, lors de l'altération de phosphate de chaux ou lors de la décomposition de la matière organique, sur les hydrates de fer plutôt que sur les oxydes de fer cristallisés.

La réaction de l'acide phosphorique libre ou soluble sur les oxydes cristallisés de fer a été étudiée en particulier par J. M. Bastos de Macedo, qui a montré que la fixation de  $P_2O_5$  soluble sur la goethite bien cristallisée semble être essentiellement un phénomène d'adsorption.

Le phosphate d'alumine le plus fréquemment observé dans les sols, soit sous forme libre, soit sous forme précipitée sur les argiles ou les hydroxydes d'alumine, est voisin de la varisite. C'est encore un phosphate hydraté. Il est soluble en solution alcaline ou soluble dans une solution de fluorure d'ammonium à pH 7, qui a l'avantage de ne pas solubiliser les phosphates de fer. Il se forme par action de l'acide phosphorique sur

ruginous soils that there is a chance of finding these forms of calcium phosphate.

The essential and most easily attackable part is soluble in dilute acids, particularly citric or oxalic acid. These acids can also dissolve some forms of phosphorus bound to organic matter, and of phosphates bound to clays, as well as some forms of iron phosphate (W. D. Bishop and S. A. Barber). It is for this reason that this method can probably still be used, and has been used by some workers, to determine the reserve of assimilable phosphoric acid present in soils of the not very leached tropical ferruginous type, the free iron content of which remains relatively low. This is probably the limit of the usefulness of this method, for all the forms to be examined later are not sufficiently soluble in this reagent, and form the main part of the phosphates present in leached tropical ferruginous soils or in ferrallitic soils.

#### *Phosphates of iron and phosphates of aluminium*

These are probably hydrated iron phosphates of the dufrénite type, or, in the English literature, rockbridgite (C.V. Fife). These phosphates can be dissolved in alkaline solutions such as 0.1 n soda, an extractant often employed, particularly after D. H. Saunder's work. They are also slightly soluble in acid solution.

They result from the reaction of phosphoric acid made soluble during the decomposition of calcium phosphates, or on the decomposition of organic matter, with iron hydroxides rather than crystalline iron oxides.

The reaction of free or soluble phosphoric acid with crystalline iron oxides has been studied, particularly by J.M. Bastos de Macedo, who has shown that the fixation of soluble  $P_2O_5$  on well crystallised goethite appears to be essentially an adsorption phenomenon.

The aluminium phosphate most frequently observed in soils, either free, or precipitated on clays or aluminium hydroxides, is close to variscite. This is still a hydrated phosphate. It is soluble in alkaline solution or in a solution of ammonium fluoride at pH 7, which has the advantage of not dissolving iron phosphates. It is formed by the action of phosphoric acid on hydrargilite, or probably on clays. But, as with

l'hydrargilite ou probablement sur les argiles. Mais comme dans le cas des phosphates de fer, ce phosphate d'alumine ne paraît pas se produire par réaction sur les hydroxydes et oxydes d'alumines bien cristallisés tels que la gibbsite.

A la suite de travaux américains, ceux de M. L. Jackson en particulier, les Portugais (J. M. Bastos de Macedo, E. P. Cardoso Franco, J. A. C. Povoas) ont fait en Angola des études intéressantes sur les différentes formes d'acide phosphorique dans les divers types de sols de ces régions. C'est ainsi que Cardoso Franco a montré qu'en sol ferrallitique toute la série de ces si nombreuses formes d'acide phosphorique ne représente le plus souvent que de 7 à 20 %. Dans les sols calsiallitiques au contraire, qui correspondent aux sols fœnés des régions tropicales, la proportion en est beaucoup plus importante. Elle peut aller jusqu'à 90 % et plus.

#### *Les phosphates inclus*

Sur le plan purement pédologique et cristallographique, ces phosphates ont de l'importance, mais sur le plan agronomique ils en ont beaucoup moins à cause de leur faible solubilité.

Ils ont été étudiés par M. L. Jackson et S. C. Chang et correspondent soit à des phosphates de fer, soit à des phosphates d'alumine, soit à des phosphates mixtes de fer et d'alumine, tels que la barrandite, inclus dans des revêtements ferrugineux.

Ceux-ci peuvent avoir une grande importance en volume par rapport à la masse en question, mais ils ont surtout une forte influence sur l'évolution de ces phosphates de fer et d'alumine, car ils empêchent presque complètement leur action dans le sol.

Ces revêtements ferrugineux peuvent être solubilisés au laboratoire par le réactif de Jackson et Aguilera, qui est à base de bisulfite et de citrate de sodium. Ensuite, on utilise les réactifs habituels : fluorure d'ammonium et soude diluée, pour séparer, dans ces phosphates inclus, le phosphate de fer et le phosphate d'alumine. Malheureusement, nous ne savons que très mal jusqu'à quel point, dans les phénomènes internes au sol, ces revêtements ferrugineux sont susceptibles de se dissoudre et de libérer cette réserve d'acide phosphorique trop étroitement tenue par le sol.

iron phosphates, this aluminium phosphate does not seem to be produced by reaction with well crystallised hydroxides and oxides of aluminium such as gibbsite.

As a result of American work, particularly that of M. L. Jackson, the Portuguese (J. M. Bastos de Macedo, E. P. Cardoso Franco, J. A. C. Povoas) have done some interesting work in Angola on the different forms of phosphoric acid in the different soil types of this region. Thus, Cardoso Franco has shown that for the ferrallitic soils of Angola, the whole series of these many forms of phosphoric acid in most cases represent only 7 to 20%. In the calsiallitic soils, on the contrary, which correspond to the dark soils of tropical regions, the proportion of these forms is much larger. It can reach 90% or more.

#### *Enclosed phosphates*

On the purely pedological and crystallographic level, these phosphates are of importance, but are much less so agriculturally because of their low solubility.

They have been studied by M. L. Jackson and S. C. Chang and are either phosphates of iron or phosphates of aluminium, or mixed phosphates of iron and aluminium, such as barrandite, enclosed in ferric coatings.

The latter can be very large in volume as compared with mass, but their main importance is the great effect they have on the evolution of these phosphates of iron and aluminium, almost completely preventing any action by them on the soil.

These ferruginous coatings can be dissolved in the laboratory by Jackson and Aguilera's reagent, based on bisulphite and citrate of sodium. Then the usual reagents are used: ammonium fluoride and dilute soda in order to separate the phosphate of iron and the phosphate of aluminium in these enclosed phosphates. Unfortunately we have very little knowledge of the extent to which, within the soil, these ferruginous coatings are capable of dissolving, and of liberating this reserve of phosphoric acid closely held by the soil.

Répartition des différentes formes de phosphates dans l'horizon supérieur de deux sols  
des îles Hawaiï

*Distribution of the different forms of phosphates in the upper horizon of two soils  
of the Hawaiian Islands*

p.p.m.

	Sol I <i>Soil I</i>	Sol II <i>Soil II</i>
Phosphate de chaux ( <i>Calcium phosphate</i> ) .....	10	6
» d'alumine ( <i>Aluminium phosphate</i> ) .....	20	0
» de fer ( <i>Iron phosphate</i> ) .....	123	42
» » inclus ( <i>Iron phosphate enclosed</i> ) .....	504	320
» d'alumine inclus ( <i>Aluminium phosphate enclosed</i> ) ..	97	40

Ces quelques données (d'après Jackson) montrent bien la répartition habituelle des différentes formes de phosphates dans les sols des régions tropicales humides.

*Passage d'un type de phosphate dans l'autre*

*Fixation de l'acide phosphorique*

A côté même du problème réel de la fixation de l'acide phosphorique dans les sols des régions tropicales, il en est d'autres qu'on ne peut qu'effleurer, en particulier le vieillissement de ces diverses formes au cours du temps. Il ne s'agit pas seulement de ce qui arrive lorsque l'on apporte de l'extérieur l'une quelconque de ces formes, mais de ce qui se produit dans un sol au cours des ans. Un sol donné, dans un certain état d'équilibre à un moment donné vieillit simplement d'année en année. Il semble qu'il y ait un vieillissement de forme et un passage d'une forme dans une autre, et que la forme qui paraît la plus stable, la forme définitive en quelque sorte, vers laquelle les autres tendraient, serait non pas comme on l'a dit quelquefois la forme phosphate d'alumine, mais la forme phosphate de fer.

Qu'arrive-t-il lorsque l'équilibre est rompu par des modifications brutales de certaines conditions, en particulier du pH ? Ceci peut provenir d'un chaulage, mais aussi comme conséquence de certaines mauvaises méthodes de culture. Il n'est pas rare de voir, en très peu d'années de culture, le pH baisser de 1 ou 1,5. Le problème a été étudié en particulier par W. D. Bishop et il ne semble pas que les modifications de forme des phosphates soient très rapides, beaucoup moins en réalité qu'on ne l'a souvent pensé.

These few results (after Jackson) show well the usual distribution of the different forms of phosphates in the soils of wet tropical regions.

*Passage of one kind of phosphate into another*

*Fixation of phosphoric acid*

In addition to the essential problem of the fixation of phosphoric acid in the soils of tropical regions, there are others which can only be touched upon, in particular the ageing of these different forms with the passing of time. It is not only a question of what happens when any one of these forms is applied from outside, but of what occurs within a soil with the passing of time. A given soil in a given state at a given time, ages simply from year to year. It appears that there is an ageing of form, and a passage from one form into another, and the form which appears to be most stable, the final form, as it were, towards which the others tend, is not phosphate of aluminium, as has sometimes been said, but phosphate of iron.

What happens when the equilibrium is disturbed by large modifications in certain conditions, particularly in pH? This may come about through liming, but also as a consequence of certain cropping methods. It is not unusual to observe a drop in pH of 1 or 1.5 units after a very few years of cultivation. The problem has been studied by W. D. Bishop in particular, and it appears that the changes in form of the phosphates may not be very rapid, much less so in fact than has often been thought.

Le problème est différent et les transformations de forme sont importantes lorsque l'on apporte brutalement au sol une certaine forme de phosphate, en particulier l'une des plus évolutives, comme par exemple les phosphates solubles. La fixation des phosphates solubles apportés aux sols tropicaux a été étudiée par de nombreux auteurs : J. Forestier, S. C. Chang, M. L. Jackson, J. M. Bastos de Macedo, E. P. Cardoso Franco, etc.

Il semble que la transformation du phosphate soluble apporté en une forme peu soluble de phosphate de fer, plus encore que de phosphate d'alumine, soit un phénomène d'abord très rapide, puis, dans une seconde phase, beaucoup plus lent. Finalement, ce processus s'arrête à un certain niveau de richesse du sol en acide phosphorique qui est en rapport, en particulier d'après les travaux de Cardoso Franco, plutôt avec la proportion de fer libre dans le sol qu'avec la proportion même d'alumine libre. C'est aussi en relation avec la quantité d'argile du sol et son degré de saturation. La corrélation entre la teneur du sol en argile et la quantité d'acide phosphorique dans le sol au point de saturation de cette capacité de fixation, n'est pas très étroite. Il est probable qu'il s'agit simplement d'une relation indirecte, mais c'est essentiellement la richesse en fer et peut-être, en alumine, qui intervient dans ce phénomène.

#### IV. — RÉPARTITION DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE TOTAL DANS CERTAINS SOLS DES RÉGIONS TROPICALES.

Un problème intéressant est de savoir si la répartition de l'acide phosphorique est exactement la même dans les sols de forêt et de savane, en admettant qu'il s'agit de la même roche. Quelquefois, nous pouvons même avoir affaire à des climats très voisins, car il peut exister côte à côte sur une même roche une forêt et une savane.

Un auteur anglais, qui travaille au Ghana, P. H. Nye, a montré que d'une façon très régulière, sur les mêmes roches, les sols de savane sont plus pauvres en acide phosphorique total dans leur horizon supérieur que les sols de forêt. C'est ainsi qu'en savane on a par exemple 70 p.p.m., contre 226 en forêt sur la même roche, 130 contre 215, 325 contre 509.

Un autre point important est la répartition différente de l'acide phosphorique dans les profils de sols de savane ou de forêt. Pour les sols de savane, en règle générale, la teneur en acide phosphorique total est un peu plus faible dans l'horizon superficiel que dans les horizons pro-

The problem is different and the changes of form are important when a certain form of phosphate is abruptly added to a soil, particularly one of the forms most apt to affect evolution, as for example soluble phosphates. The fixation of soluble phosphates applied to tropical soils has been studied by many workers : J. Forestier, S. C. Chang, M. L. Jackson, J. M. Bastos de Macedo, E. P. Cardoso Franco, etc.

It appears that the conversion of added soluble phosphate into a slightly soluble form, such as phosphate of iron still more than phosphate of aluminium, is a phenomenon which is at first very rapid, becoming much slower in a second phase. Finally this process stops, at a certain level of soil phosphoric acid related, according to the work particularly of Cardoso Franco, more to the proportion of free iron in the soil than to the proportion of free aluminium. It is also related to the amount of clay in the soil, and its degree of saturation. The correlation between the soil's content of clay and the amount of phosphoric acid in the soil at the saturation point of this fixation capacity is not very close; probably it is a question of an indirect relationship, but it is essentially the content of iron, and perhaps of aluminium, which plays the decisive part in this phenomenon.

#### IV. — DISTRIBUTION OF TOTAL PHOSPHORIC ACID IN CERTAIN SOILS OF TROPICAL REGIONS

An important problem is whether the distribution of phosphoric acid is exactly the same in forest soils and savannah soils, assuming the same parent rock. Sometimes even a question of closely neighbouring climates may be involved, as a forest and a savannah can exist side by side on the same kind of rock.

A British worker in Ghana, P. H. Nye, has shown that, in a very regular way on the same rocks, savannah soils are poorer in total phosphoric acid in their upper horizon than forest soils are. Thus in savannah there were, for example, 70 ppm as against 226 in forest on the same rock, 130 against 215, 325 against 509.

Another important point is the different distribution of phosphoric acid in the profiles of savannah and forest soils. For savannah soils, as a general rule, the content of total phosphoric acid is rather smaller in the surface horizon than in the deeper horizons. On the other hand,

fonds. Par contre, quand il s'agit d'un sol forestier non dégradé, qui est encore sous forêt, la teneur en réserves phosphoriques est toujours plus importante dans l'horizon supérieur que dans les horizons immédiatement sous-jacents. Dans ces sols ferrallitiques, non ou peu lessivés, la teneur en réserves phosphoriques tend à diminuer en profondeur, puis à atteindre un niveau qui reste le niveau stable en quelque sorte jusqu'à l'horizon d'altération de la roche, c'est-à-dire au matériau originel. Dans les sols ferrallitiques lessivés, moins répandus que les précédents, que certains pédologues anglais, par exemple du Ghana, appellent oxy-sols par opposition aux premiers dénommés ochro-sols, la teneur en acide phosphorique, forte dans l'horizon supérieur, devient faible dans les horizons juste en dessous (vers 50 cm à 1 m suivant les cas), puis remonte quelquefois très fortement dans les horizons d'accumulation, vers 1 ou 1,50 m, suivant les cas. C'est ainsi par exemple qu'au Congo Belge on avait en surface 13 mg de  $P_2O_5$  total pour 100 g de sol sec dans l'horizon de 0 à 20 cm, puis 7 mg en dessous et on remontait à 19,2 mg à 1 m de profondeur, pour redescendre à 12 mg environ à 1,50 m de profondeur.

En ce qui concerne les sols ferrallitiques sous culture, leur fertilité dépend essentiellement de la façon dont ils ont été cultivés et en particulier défrichés. La fertilité est avant tout fonction de la façon dont les 10 cm supérieurs de ces sols forestiers qui contiennent l'essentiel de la richesse chimique des sols des régions tropicales humides ont été conservés ou non lors du défrichement, puis de la mise en culture.

with a non-degraded forest soil, still under forest, the content of phosphate reserves is always greater in the upper horizon than in the horizons immediately below. In unleached or slightly leached ferrallitic soils, the content of phosphate reserves tend to decrease at depth and then to reach a level remaining more or less constant until the weathering crust is reached, that is, the original material. In the leached ferrallitic soils, less widespread than the preceding soils, and called by some British workers, for example in Ghana, oxysoils, as opposed to the earlier ones called ochrosoils, the high phosphoric acid content of the upper horizon becomes low in the immediately underlying horizons (towards 50 cm to 1 m, depending on the circumstances) then sometimes increasing very strongly in the accumulation horizons, towards 1 m or 1.50 m depending on the conditions. Thus for example in the Belgian Congo the 0-20 cm horizon contained 13 mg of total  $P_2O_5$  per 100 g of dry soil, then 7 mg below, rising again to 19.2 mg at 1 m depth and falling to about 12 mg at 1.50 m depth.

As regards ferrallitic soils under a crop, their fertility depends essentially on the way in which they have been cultivated, particularly the way in which they have been cleared. It depends primarily on how the upper 10 cm of these forest soils, which contain the main part of the chemical wealth of the soil in wet tropical regions, have been conserved or not at clearing, and then on cropping.

## REFERENCES

---

- BARBIER G. — Introduction à l'étude des phosphates du sol. *C.R. Congrès Inter. Sc. Sol, Paris 1956*, B, II, 387-402, bib. (107 réf.).
- BASTOS DE MACEDO J.M. — Application de l'équation de Hill au devenir des phosphates dans les sols. (An application of the Hill equation to phosphate behavior in soils). *3<sup>me</sup> Conf. Interafricaine Sols, Dalaba*, 1959.
- BISHOP W.D. & BARBER S.A. — Effet des composés du phosphore du sol sur les corrélations obtenues avec les tests de sols. (The effect of soil phosphorus compounds on soil test correlation). *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, 1958, 22, 5, 435-9, 3 fig., 3 tab., bib. (16 réf.).
- BOUYER S. — Etudes sur l'acide phosphorique assimilable des sols tropicaux. *Fertilité*, 1959, 6, 13-28.
- CARDOSO FRANCO E.P. & CASTANHO POVOAS J.A. — Fractionnement du phosphore inorganique de quelques sols ferrallitiques et calsiallitiques d'Angola. (Fractionation of inorganic phosphorus of some ferrallitic soils and a calsiallitic soil from Angola). *3<sup>me</sup> Conf. Interafricaine Sols, Dalaba*, 1959.
- CHANG S.C. & JACKSON M.L. — Fractionnement du phosphore du sol. (Fractionation of soil phosphorus). *Soil Sc.*, 1957, 84, 2, 133-44, 5 tab., bib. (14 réf.).
- CHANG S.C. & JACKSON M.L. — Les fractions du phosphore du sol dans quelques sols typiques. (Soil phosphorus fraction in some representative soils). *Journ. Soil Sc.*, 1958, 9, 1, 109-19, 3 tab., 2 fig., bib. (25 réf.).
- VAN DIEST A. & BLACK C.A. — Le phosphore organique du sol et la croissance des végétaux. I. Le phosphore organique du sol hydrolysé par les traitements à l'hypobromite. *Soil Sc.*, 1959, 87, 2, 100-4, 2 tab., bib. (11 réf.). II. Le phosphore organique minéralisé pendant l'incubation. *Soil Sc.*, 1959, 87, 145-154. (Soil organic phosphorus and plant growth: I. Organic phosphorus hydrolyzed by alkali and hypobromite treatments. II. Organic phosphorus mineralized during incubation).
- FIFE C.V. — Utilisation du fluorure d'ammonium comme élément sélectif pour extraire le phosphate lié à l'aluminium du sol. I. Etudes préliminaires sur les éléments phosphatés en dehors du sol. *Soil Sc.*, 1959, 87, 1, 13-21. II. Etudes préliminaires sur les sols. *Soil Sc.*, 1959, 87, 2 82-8, 1 tab., 3 fig. (9 réf.). (An evaluation of ammonium fluoride as a selective extractant for aluminium bound soil phosphate. I. Preliminary studies on soils systems. II. Preliminary studies on soils).
- FORESTIER J. — Rétrogradation du phosphore assimilable dans les sols oubanguiens. *Bureau des Sols, AEF, ORSTOM*, 1958.
- HEMMOLL J.B. — Rôle des minéraux des argiles des sols dans la fixation du phosphore. (The role of soil clay minerals in phosphorus fixation). *Soil Sc.*, 1957, 83, 2, 101-8, 2 tab., 1 fig. (24 réf.).
- KITTRICK J.A. & JACKSON M.L. — Observations au microscope électronique de la réaction du phosphate avec les minéraux. (Electron microscope observation of the reaction of phosphate with minerals). *Journ. Soil Sc.*, 1956, 7, 1, 81-9, 1 fig., 2 tab., 3 pl. h-t., bibl. (réf.).
- NYE P.H. & BERTHEN M. — Distribution du phosphore dans les sols de forêt et de savane de Gold Coast. (The distribution of phosphorus in forest and savannah soils of the Gold Coast). *Journ. Agric. Sci.*, 1957, 49, 2, 141-59, 8 tab.
- SAUNDER D.H. — Détermination du phosphore assimilable des sols tropicaux par extraction à la soude. (Determination of available phosphorus in tropical soils by extraction with sodium hydroxyde). *Soil Sc.*, 1956, 82, 457-63, 2 fig. (12 réf.).
- WILLIAMS E.G. & SAUNDERS W.D.H. — Signification des fractions granulométriques du sol par rapport à sa teneur en phosphore facilement solubilisé suivant les méthodes à l'acide acétique, de Truog et au lactate. (Significance of particle size fractions in readily soluble phosphorus extraction by the acetic, Truog and lactate methods). *Journ. Soil Sc.*, 1956, 7, 2, 189-202, bib., 6 tab. (14 réf.).