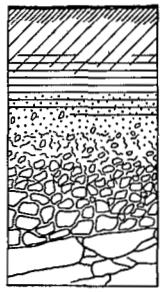
J. BOYER

LES SOLS FERRALLITIQUES

Tome X

facteurs de fertilité
et utilisation des sols



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER

ORSTOM

INITIATIONS-DOCUMENTATIONS TECHNIQUES N° 52

LES SOLS FERRALLITIQUES

Tome X

Facteurs de Fertilité et utilisation des sols

J. BOYER

ORSTOM
PARIS
1982

L'ouvrage de synthèse sur les sols ferrallitiques comprendra 10 tomes dans la collection *Initiations-Documentations Techniques* de l'ORSTOM.

1. *Historique, développement des connaissances et évolution des concepts*, par Y. CHATELIN. — *Paru* (1972).
2. *Climat et Géomorphologie*, par Y. CHATELIN et J. RIOU.
3. *L'altération ferrallitique*, par Y. CHATELIN — *Paru* (1974).
4. *La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques*, par B. de BOISSEZON, C. MOUREAUX, G. BOQUEL et G. BACHELIER. — *Paru* (1973).
5. *Caractérisation analytique et morphologique des sols ferrallitiques*, par D. MARTIN.
6. *Caractérisation analytique et morphologique des sols ferrallitiques*, par D. MARTIN (fin).
7. *Bilan de la ferrallitisation*, par Y. CHATELIN.
8. *Classification des sols ferrallitiques*, par G. AUBERT.
9. *Géographie des sols ferrallitiques*, par P. SEGALEN.
10. *Facteurs de fertilité et utilisation des sols ferrallitiques*, par J. BOYER.

© ORSTOM 1982
ISBN : 2-7099-0637-6

AVANT-PROPOS

Il m'a été demandé par MM. Y. CHATELIN et J. BOYER de présenter ce volume. Je les en remercie bien vivement. J'en suis d'autant plus heureux qu'il ne m'est pas possible d'apporter toute la collaboration que j'aurais voulu à cette excellente série animée par Y. CHATELIN. Elle se développe comme prévu, c'est parfait. Je suis fier d'avoir à ajouter ces quelques lignes au début de ce remarquable ouvrage de M. J. BOYER.

Comme je l'écrivais, il y a près de 10 ans, dans la préface du Tome 1 de cette série, les sols ferrallitiques ont une très grande extension à la surface du globe ; il a paru nécessaire de réaliser une mise au point des connaissances que nous en avons, afin de mieux cerner les recherches qui doivent leur être actuellement consacrées. Pendant ces 10 années, beaucoup d'éléments nouveaux ont été acquis, en particulier sur leur dynamique. Il ne nous suffit pas de connaître — ou, au moins d'avancer dans leur connaissance — la formation de ces sols et leur évolution ; il nous est indispensable de savoir comment les utiliser en nous fondant sur une appréciation aussi détaillée que possible de leurs caractères de fertilité. Cela est d'autant plus utile que, par suite de leurs caractéristiques et propriétés, ainsi que des conditions écologiques dans lesquelles ils se développent, ils fournissent certaines espèces végétales naturelles ou cultivées, telles que acajou, okoumé et divers bois précieux, hévéas, palmiers à huile, cacaoyers, même caféiers etc..., dont les produits nous sont devenus indispensables et qui croissent moins facilement ou moins souvent sur d'autres types de sols : peu évolués d'apport, hydromorphes, ferrugineux tropicaux etc...

Une mise au point sur les conditions d'utilisation de ces sols — problème déjà bien abordé dans les publications de la FAO il y a quelques années — présente une grande importance, d'autant que les résultats obtenus lors de leur mise en valeur apparaissent souvent assez contradictoires. A l'analyse, et même sur une assez grande profondeur, ils semblent être souvent d'une grande pauvreté chimique, et à la limite des conditions physico-chimiques admissibles pour des cultures — ce qui ne correspond pas bien entendu, à la totalité des facteurs de fertilité — et cependant ils supportent une grande forêt dense d'une exceptionnelle vigueur ou des cultures — cacaoyers et cocotiers très productifs sur le même terrain aux Nouvelles Hébrides, par exemple — d'un très haut rendement. Certaines mises en valeur — plantations d'hévéas au Vietnam, cacaoyères en certains points de basse Côte d'Ivoire ou de l'Etat de Bahia au Brésil — sont de belles réussites, alors que d'autres, telles que des cultures annuelles de maïs, de diverses cérales, etc... doivent être abandonnées au bout de 2 ou 3 ans — Guinée, Centrafrique, Zaïre, Amazonie... etc... A des réussites dans certains cas, s'opposent des échecs désastreux dans d'autres, sans que les raisons en soient toujours totalement... ou rapidement compréhensibles. En fait, comme il est habituel, ces problèmes sont extrêmement complexes et présentent de nombreux aspects :

— problèmes physiques, de profondeur de terre (présence de carapace, de nappe de gravats, d'horizons excessivement riches en concrétions et gravillons), de possibilité de développement du système racinaire, de trop faible rétention d'eau à la disposition de plantes à système racinaire trop superficiel, de mauvaise circulation de l'eau, trop principalement latérale, comme en Guyane ;

— problèmes de conditions physico-chimiques adverses, principalement trop forte acidité de l'horizon (B) ;

— teneur pratiquement trop faible en matière organique dont l'évolution trop rapide provoque une richesse temporaire excessive en azote, suivie d'une très grande pauvreté du sol en cet élément ; activité biologique trop peu régulière (cf. tome 4 de cette série) ;

— problèmes de grande pauvreté chimique, à un moment donné, en éléments utilisables par les cultures, mais dont la dynamique peut rester cependant assez favorable à leur alimentation ; mauvais équilibres entre éléments chimiques, non seulement les plus habituels N - P - S et Ca - Mg - K, mais aussi entre différents anions et cations majeurs, sans en exclure, dans certains cas, les oligo-éléments ;

— très forte insuffisance de la présence de certains de ces oligo-éléments, tels que Mo, B, ou Cu, Zn, souvent en quantité acceptable, mais trop en profondeur.

M. J. BOYER a pris en charge cette mise au point et c'est ce volume lourd de connaissances, de faits rapportés et de discussions qui est aujourd'hui présenté. Beaucoup de lecteurs connaissent déjà ce pédologue expérimenté, soit par ses travaux propres, soit par ses mises au point sur « le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et subhumides » (série initiations — documentations techniques — ORSTOM 35 — Paris 1978) ou par sa participation avec moi-même au volume de l'Académie des Sciences des U.S.A. sur les sols des régions tropicales humides (USA Nat. Sc. Ac., Washington 1972).

Il est parfaitement adapté à ce travail par suite de sa formation d'agronome et de pédologue de l'ORSTOM, des nombreuses années qu'il a passées en Centrafrique, en Afrique Occidentale, au Brésil, par ses travaux en liaison avec les divers pédologues et agronomes de l'ORSTOM (B. BADIN, A. COMBEAU etc...), avec les agronomes de recherche en pays tropical, dans les organismes français (IRAT, CFDT, CFCC etc...), par ses innombrables contacts avec les pédologues et agronomes étrangers travaillant dans les Zones intertropicales.

Cet ouvrage est extraordinairement documenté — quoique cette documentation n'ait pas pu être exhaustive bien sûr — mais tout cela est présenté d'une manière logiquement ordonnée et reste soumis à une critique clairvoyante. Les résultats en sont très clairement exposés.

J'ai pris un très grand intérêt à étudier ce texte, car il m'a beaucoup appris.

Je suis sûr que ce volume servira à de nombreux pédologues et agronomes et qu'il sera aussi utile à tous les services de vulgarisation, pour une meilleure utilisation des sols ferrallitiques, plus rationnelle, plus conservatrice à travers le monde.

Bondy, le 15 septembre 1981

G. AUBERT

professeur de pédologie (ORSTOM)
membre et ancien président de l'Académie d'Agriculture de France
membre de l'Académie des sciences d'outre-mer

ABSTRACT

Chapter I : Environmental constraints for ferrallitic soils

As these soils develop mainly between the tropics, some climatic constraints are briefly studied such as temperature, sunshine, intensity of rains, intensity and length of the dry season and their consequences on the occurence of soil erosion (it is obvious that climatic aggressiveness is more important than the specific soil sensitivity).

Unlevelled topography is another important factor of erosion. One table gives declivity percentages in relation to erosion constraints under various cultivations according to some authors ; some elementary methods used to reduce it are listed.

Chapter II : Soil and pedological differences between soil horizons in relation to root penetration

Ferrallitic soils are usually rather deep to supply a sufficient « useful soil » to cultivated plant roots. Yet some accidents occuring inside the soil profile can interfere with a good root penetration and development for crops and even impede it.

There are mainly :

— the compactness of the underlying horizon (or sub-horizon)

— peculiar hydrous regimes such as the horizontal internal drainage and seasonal water-logged horizons near the soil surface

— the presence of dense and thick stone-lines

— duripans and fragipans at low depth.

In conclusion, there are some tables showing degrees of agricultural limitations according to the depth of « useful soil ».

Chapter III : Soil components : coarse elements and fine earth

This chapter deals with the physical components of soil. Coarse elements, gravels, pebbles, stones, boulders, rocks introduce two sorts of constraints : at first, when they are localized at the soil surface or in the arable layer (they are most often small limitations for manual cultivation), secondly when they are situated in soil depth (ferruginous gravels of stone-lines are especially studied). Tables are showing degrees of limitations due to coarse elements in each situation.

Fine earth texture has only a poor direct influence on root penetration and plant yields, except for very sandy or very heavy clayed soils and for some sensitive crops (pine apple, peanuts...). But soil texture is related at different degrees to soil compactness, permeability and drainage, available water, organic matter and cation exchange capacity : hence there are some agricultural limitations which are indirectly related to the fine earth texture.

Chapter IV : Soil structure and its stability

After a short survey of the methods allowing to measure the diameter, the quantity and the stability of soil aggregates (especially I_S test of HENIN), factors determining the structure properties of ferrallitic soils are reviewed and discussed : calcium, organic matter (very important for soil upper layers), iron (predominant part played by iron in lower layers), clay, action of plant roots.

Some data are given about the seasonal changes in structure stability under ferrallitic conditions and the means which are more or less easy to use in order to restore it after cultivation.

Chapter V : Soil porosity (porosity, compactness, bulk density, particular density)

After giving some definitions, this chapter deals mainly with porosity factors (structure, texture, « soil climate »...) and values of porosity in ferrallitic soils, as well as their decrease under cultivation and processes to improve them.

A special attention is paid to agricultural limitations in relation to porosity and its limits of adequacy (between 40 % and 60 %).

Chapter VI : Hydrous properties

At first, there are the definitions and the methods for measuring some hydrous characteristics such as the wilting point, the field capacity, the available water, permeability and drainage (vertical and horizontal).

Generally, ferrallitic soils have satisfactory hydrous properties :

— available water usually between 10 and 14 mm for each soil layer of 10 cm in thickness

— high or rather high permeability

— easy drainage.

On the other hand, climatic conditions, heavy rains with the heaviest part concentrated over short periods lead to an important leaching.

Cultivation leads to a decrease in permeability which is usually reasonable. But with the formation of a surface crust, a considerable runoff can occur.

Chapter VII : Origin of the elements necessary for the plant growth

The three main origins of soil nutrients are :

— *the parent material* which gives the major cations (Ca, Mg, K, Na), phosphorus and minor elements. The ferrallitic pedogenesis plays a great part in removing most of these elements when moving from the parent material to the soil. On the other land, some processes such as sheet erosion, outer deposits (volcanic ashes), the action of the soil fauna and mainly the action of vegetation delay the impoverishing effect resulting from ferrallitization.

— *vegetation* : the destruction of the natural vegetation supplies the soil under cultivation with a certain amount of nutrients. This amount is often higher than the amount already present in the soil under tropical rain forest.

Tables show how considerable and necessary this supply is in order to carry out cultivations under poor soil conditions.

— *atmosphere* : the soil nitrogen results firstly from the atmosphere, whether it is fixed by bacteria (and algae) or carried by rain.

Rain contains limited amounts of sulphur, chlorine and low amounts of alkaline and alkaline-earth cations (Ca, Mg, K, Na).

Chapter VIII : Forms of the soil chemical elements in relation to fertility and analysis methods

Despite its imperfections, the chemical analysis remains the simplest and most usual method in order to evaluate the quantities of chemical elements which are found in the soil and are likely to be really absorbed by the plant.

Nitrogen : although plants can absorb only mineral nitrogen (NO_3^- and NH_4), the Kjeldhal method is the most useful and the most used as far as the measurement of the total soil nitrogen is concerned, despite the existence of various tests or fractionation intended to measure the capacity of organic nitrogen to be quickly mineralized.

Sulphur : it is found in soils mainly in the organic form and sometimes in the form of sulphates which are the only ones to be assimilated by roots. Nevertheless, measurements are made mainly on the total sulphur as is the case for nitrogen.

Phosphorus : the relative value of very numerous methods for the titration of phosphorus are discussed here : total phosphorus, available phosphorus (acid-soluble, alkaline-soluble), labile phosphorus, phosphorus likely to become assimilable in the future etc. as well as the dynamic approach to this problem (phosphate potential, Larsen's factors). The most representative types of soil phosphorus used by crops seem to be the phosphorus which can be isotopically diluted, the phosphorus extracted from resins and the Chang and Jackson fractionation ; but as far as the routine titrations are concerned, preference is given to the Bondy, Olsen and sometimes Bray n° 2 methods.

Potassium : apart from the traditional distinction between the total and exchangeable potassium, chemists revealed a potassium which is available in short or medium term through different methods briefly mentioned here. Nevertheless, the measurement of the exchangeable potassium remains the most used method.

Calcium and magnesium : these two elements represent the majority of the cations fixed on the absorbing complex. When making the classical distinction between exchangeable and non-exchangeable elements, it is emphasized that the forms assumed by the reserves of Ca and Mg are badly known.

Aluminium : among the types of aluminium present in the soil, the exchangeable aluminium and the analytical methods which allow to titrate it are emphasized.

Minor elements : the minor elements which are studied here (B, Cu, Mo, Mn, Zn) are found in the soil either held by clay colloids or especially chelated by organic matter. The main methods of titration likely to characterize them are mentioned.

As far as most of the elements mentioned here are concerned, tables show the contents which are found in some ferrallitic soils.

Chapter IX: The dynamics of major anions such as nitrogen, sulphur and phosphorus

The forms of nutrients defined in chapter VIII are unstable in soil and develop under the influence of various factors among which cultivation plays a great role.

Nitrogen : the phenomena of mineralization which bring about the formation of nitrates prevail in the dynamics of the soil nitrogen. The mineralization of the soil organic nitrogen is accelerating sharply when there is cultivation (decrease by 40 % of the soil organic matter during the first two years of cultivation).

The resulting mineral nitrogen shows a maximum at the beginning of each rainy season (nitrate flush) and it is not very subject to air losses but it is very sensitive to the washing off.

Sulphur : the sulphur dynamics is similar to this of nitrogen ; but it seems that the mineralization of the sulphur organic compounds is developing more slowly than this of the nitrogenized compounds. The resulting sulphates are very sensitive to leaching despite a real retention on clays.

Phosphorus : soil phosphorus is not very sensitive to leaching ; on the other hand, it is subject to phenomena of retrogradation or insolubilization by the iron and aluminium compounds which are normally abundant in ferrallitic soils. Processes of retrogradation are discussed here as well as the possibility for the insolubilized phosphorus to become again available.

Chapter X : Dynamics of the major cations such as potassium, calcium, magnesium, aluminium and some minor elements such as boron, copper, manganese, molybdenum, zinc and chlorine

Potassium : it is a nutrient which is very sensitive to leaching insofar as it is not fixed on sites specific of the absorbing complex.

Although there is no potassium retrogradation under ferrallitic conditions, the potassium contained in reserves is likely to regenerate the exchangeable potassium, especially in fallows.

Calcium and magnesium : these are two elements whose dynamics is controled by processes of leaching. Their various factors which can encourage it or reduce it are studied here : vegetation, pluviometry and drainage, Ca and Mg contents in soil, mineral fertilizer, particularly nitrogenized fertilizer, etc.

Exchangeable aluminium : aluminium in the ionic form is found on the absorbing complex as far as soil pH equal to 5.2-5.0 and especially lower than this figure are concerned and increases exponentially in relation to the decrease in pH. It gives birth to a buffer in soil towards pH 4.0-4.5and changes the soil properties with respect to potassium, phosphorus and sulphates.

Great amounts of it are found in depth and form a « chemical barrier » which cannot be penetrated by roots and is very difficult to suppress through liming.

Minor elements (B, Cu, Mn, Mo, Zn, Cl) : their soil dynamics in is controlled by the pH and the organic matter. A decline in pH increases the assimilability of the minor elements and, conversely, an increase in the pH decreases the availability of the minor elements. Only molybdenum get an opposite behaviour. The organic matter renders minor elements insoluble by forming complexes with the latter.

Mineral colloids, calco-magnesian amendment and the reducing conditions of the environment have a lesser influence on the assimilability than the two previous factors.

Chlorine is a particular case : as a matter of fact, it is carried by the atmosphere and it is then leached in soil quickly.

Chapter XI : Equilibria between the soil chemical elements (antagonisms, synergies, interactions)

This chapter tries to take stock of the important and rather neglected question concerning the equilibria between soil elements which contribute to plant nutrition. The most important ones are :

C/N : optimum value between 8 and 13.

$\frac{\text{Total N}}{\text{Total } P_2O_5}$: validity threshold between 2 ans 4 (Synergy N-P).

$\frac{N}{S}$: validity threshold between 5 and 15, optimum value towards 10.

$\frac{Ca}{Mg}$: optimum value between 1 ans 5 for perennial plants and between 1 and 10 for the other crops (Antagonism Ca-Mg).

$\frac{Mg}{K}$: optimum value towards 3 ; probable variability in the validity thresholds according to the soil contents in Mg and K (antagonism between Mg and K).

$\frac{Ca}{K}$: antagonism which is often studied in the form of the ratio $\frac{Ca + Mg}{K}$ whose validity thresholds range roughly from 15 to 40.

The exchangeable aluminium and the minor elements also have an influence, although it is impossible to use ratios in order to evaluate their mutual actions :

Antagonisms : Ca-Al, Ca-Mn, Mg-Mn, K-Mn, P-Al, K-Mo, K-B, N-B, Al-Mn, Mo-Mn, Zn-As...

Synergies : Ca-Mo, K-Fe, P-Mn, P-Cu, P-Zn, P-Si, Al-Mn...

In the conclusion, this chapter tries to emphasize the complexity of this question of equilibria.

Chapter XII : Soil contents, anions and cations, consistent with the crop (critical values, fertility scales and agricultural limitations)

One tries to quanify the notions about the fertility factors or the agricultural limitations by considering thresholds values or critical values which are rather well-known for the following major soil elements :

Phosphorus : deficiency threshold between 25 and 100 ppm of assimilable P (Bondy method) according to the soil fixing power.

Potassium : mean severe deficiency threshold evaluated at 0.10 meq/100 g ; mean weak deficiency threshold or threshold of non response to K-fertilizers evaluated at 0.20 meq/100 g. But there is a high variability in these figures in relation to the soil content in fine elements (clay + loam).

Magnesium : Severe deficiency threshold towards 0.17 meq/100 g ; weak deficiency threshold or threshold of non response to Mg-fertilizers towards 0.30-0.40 meq/100 g.

As far as the minor elements are concerned, it seems almost impossible to determine such threshold values, except for boron (ranging from 0.10 to 0.20 ppm of boron extracted with hot water).

Fertility scales for N, P, K, Ca, Mg and Al give a more precise view on the potential soil fertility or the resulting agricultural limitations.

Finally, it is possible to have a synthetic, although imprecise and incomplete view, on the agricultural potentialities of ferrallitic soils by giving consideration to the pH.

INTRODUCTION

Les appréciations sur la fertilité des sols ferrallitiques n'ont fait que tardivement leur entrée dans l'histoire de l'humanité.

Il y eut bien le fameux périple d'HANNOM qui, deux siècles avant notre ère, amena cet amiral carthaginois jusqu'au fond du golfe de Guinée ; mais les textes de seconde main qui nous relatent cette extraordinaire aventure ne font pas guère mention de la luxuriance de la végétation — qui avait pourtant dû attirer le regard de marins ayant longé pendant des semaines et des mois les côtes arides du Sahara — et encore moins des sols ; ils ont surtout retenu l'aspect anecdotique de cet exploit : œil de cyclone aperçu la nuit dans les nuages (le Mont Cameroun était effectivement en éruption à cette époque), constellations inconnues du ciel qui effrayèrent tant les superstitieux carthaginois...

Seize siècles plus tard, les rudes marins d'Henri-le-Navigateur doublaient largement le cap Vert mais ils étaient plus soucieux de trouver la route des Indes et des épices que de faire même sommairement ce que nous appelerions maintenant de l'écologie.

Les grandes découvertes maritimes (du XV^{e} et du XVI^{e} siècles) allaient toutefois amener rapidement des contacts plus enrichissants mais parfois non exempts d'une certaine candeur. Christophe COLOMB n'écrivait-il pas avec une naïveté désarmante en contemplant un paysage des Caraïbes : « L'attrait de ce nouveau pays dépasse de beaucoup celui de la campagne de Cordoue. Les arbres brillent d'un feuillage toujours vert et sont éternellement chargés de fruits... Il me semblait que je ne pourrais jamais quitter un tel lieu. »

En fait, c'est l'énorme forêt des tropiques humides qui a d'abord frappé tous ceux qui n'étaient pas trop obnubilés par la fièvre de l'or et des conquêtes. De nombreux voyageurs décrivent avec enthousiasme certes, mais souvent aussi avec une point d'effroi, la puissance des frondaisons, la hauteur des arbres, le lacis inextricable des lianes et des épiphytes et aussi les mystères qu'elle pouvait receler dans ses profondeurs. Et cet enthousiasme, cet attrait, cette angoisse aussi, que la grande forêt secrète, on les retrouve toujours, puisque AUBREVILLE relate ainsi ses impressions de forestier néophyte : « En 1925, nous débarquions pour la première fois en Côte d'Ivoire... Déjà, du paquebot qui, vers Dabou, se rapproche de la côte et suit une ligne parallèle pendant longtemps, elle (la forêt) nous apparaissait comme une bande rectiligne sombre, immense et inquiétante... Dès nos premiers contacts avec la grande forêt, nous sentions à quel point elle nous était étrangère à nous autres « Blancs »... »

Naturellement on a pensé tout de suite qu'une végétation si puissante ne pouvait exister que sur des sols d'une très grande richesse. L'un des meilleurs scientifiques de la fin du XVIII^{e} siècle, Alexandre de HUMBOLT, l'atteste ainsi : « La terre est surchargée de végétaux. Rien n'arrête leur libre développement. Une couche immense de terreau manifeste l'action non interrompue des forces organiques... Ici dans un pays fertile, paré d'une éternelle verdure, on cherche en vain les traces de la puissance de l'homme. »

Fort heureusement pour sa mémoire, HUMBOLT a d'autres titres de gloire que cette appréciation de style agronomique ; celle-ci toutefois reflète bien les sentiments de l'époque : une fertilité immense, inépuisable de ces sols que nous appelons maintenant ferrallitiques.

Et pourtant déjà la « puissance de l'homme » s'était manifesté par des défrichements, des cultures, et... la stérilisation du moins partielle de certains sols. Le phénomène resta

longtemps marginal en raison de la monoculture de fait de la canne à sucre, plante en définitive assez conservatrice de la fertilité, et aussi de l'ampleur des réserves de terres vierges par rapport aux superficies restreintes mises en culture.

On prit une conscience aiguë de la fragilité de la fertilité des sols ferrallitiques vers la fin du XIX^{e} siècle, au point qu'ensuite, pendant la première moitié du XX^{e} siècle, on professait ouvertement que seuls deux types de cultures pouvaient être pratiquées sans risques, sur les mêmes terres, sous les tropiques humides : la riziculture inondée et les plantations arborées et arbustives associées à des plantes de couverture. Et encore ceci était surtout valable pour l'Extrême Orient, beaucoup moins pour l'Afrique encore un peu « terra incognita » du point de vue agronomique. Quant aux autres plantes cultivées, vivrières en particulier, on ne pouvait guère les produire qu'en culture itinérante avec de très longues jachères, forestières de préférence ; et si on voulait éviter à long terme la stérilisation du sol, il ne fallait guère compter produire plus que la subsistance de populations locales clairsemées.

Il est à peine besoin de souligner ce qu'un tel jugement a d'excessif, malgré une part incontestable de vérité. Mais en fait il ne l'est sans doute pas plus que celui que porte une nouvelle génération d'agronomes apparue depuis 1950 dont les réflexes sont plus ceux de bio-physiciens et de climatologistes que d'agriculteurs praticiens. Pour eux, les conditions de température, d'humidité, d'ensoleillement doivent faire des régions tropicales le futur grenier de l'humanité. Ce faisant, ils ont tendance à négliger le sol qui reste, malgré tout, non seulement le support des cultures, mais leur principal fournisseur en eau et en nutriments anioniques et cationiques (mis à part le carbone et l'oxygène).

Ce sera l'objet de cet ouvrage d'essayer de faire le point sur les connaissances de base acquises sur les caractéristiques qui conditionnent la mise en valeur des sols ferrallitiques, en dégageant, dans la mesure du possible, leurs qualités et leurs défauts. Son ambition est de tenter de réunir sous forme d'une synthèse, forcément trop courte, l'expérience déjà accumulée. Une impressionnante liste bibliographique située en fin de volume témoigne, en partie, de l'ampleur du travail accompli, mais ne doit pas faire illusion. Elle reste, malgré tout, fort incomplète, car il n'était pas possible de consulter tous les documents écrits en de multiples langues et répartis en d'innombrables revues et ouvrages. Que les auteurs non cités veuillent bien trouver ici les excuses de l'auteur.

D'autre part, il était nécessaire, pour une matière aussi abondante et diverse, de faire un choix : ce fut celui d'exposer éléments de fertilité ou de contraintes ou de limitations agricoles, termes considérés ici comme à peu près synonymes de facteurs qui conditionnent la production agricole dans un sol donné. Autrefois on préférait employer le terme de fertilité qui donnait un aspect positif aux appréciations du pédologue ou de l'agronome sur le sol. Actuellement on insiste surtout sur les caractères négatifs qui introduisent telle ou telle contrainte, ou limitation, aux spéculations agricoles.

Il est évident que toutes ces contraintes (ou facteurs de fertilité), qu'elles soient d'ordre climatique, physique, ou chimique ne sont que relatives. Elles dépendent non seulement des techniques utilisées (on cultive en Islande des bananiers sous serres chauffées à l'eau des geysers !), mais du contexte socio-économique qui fait qu'une culture est rentable ou non, et aussi de la volonté politique des gouvernants qui peuvent décider de subventionner ou de pénaliser telle ou telle production. C'est vraisemblablement en partie pour cette raison que pédologues et agronomes préfèrent souvent parler de contraintes, ou de limitations, qui ne les entraînent pas (ou les entraînent un peu moins) dans des considérations trop précises sur tel ou tel type de culture, dont ils savent que le développement est aussi sous la dépendance de facteurs totalement étrangers au sol.

En ce domaine on respectera les appelations données par les divers auteurs cités : fertilité ou limitations.

Cet ouvrage suivra un plan classique en la matière : après quelques indications sur les contraintes d'environnement (climat-relief), on insistera sur les limitations d'ordre physique (profondeur du sol, texture, structure, propriétés hydriques) et surtout chimiques. A propos de ces dernières, si importantes en milieu ferrallitique, il a paru nécessaire de développer, parfois longuement, des considérations sur l'origine, la forme dans le sol et la dynamique des nutriments, anions et cations, qui interviennent dans l'alimentation des végétaux cultivés.

l'environnement des sols ferrallitiques et les contraintes qui en découlent

1. LOCALISATION DES SOLS FERRALLITIQUES

Il ne peut être question ici de traiter de la géographie des sols ferrallitiques (1). Rappelons simplement qu'ils occupent pratiquement toute la ceinture chaude et humide du globe, donc qu'ils se trouvent principalement entre les tropiques.

Ce que l'on sait moins, c'est qu'ils s'étendent assez largement sur les bordures orientales des continents plus ou moins soumises à des régimes de mousson : « latossolos » du sud du Brésil qui vont pratiquement jusqu'à la frontière uruguayenne, oxisols du Natal en Afrique du Sud, « yellow and red podzolic soils » maintenant dénommés ultisols du sud-est des Etats-Unis, etc...

Ce faisant, on néglige certains sols qui ont incontestablement des caractères ferrallitiques, mais qui se trouvent actuellement en zones aride et semi-aride (par exemple les « latossolos fase árida » du Sertão brésilien) et dont on interprète l'existence comme des relictes de climats antérieurs plus humides. L'extension, mal connue, de ces sols apparaît relativement faible. En outre, les conditions climatiques auxquelles ils sont soumis actuellement donnent à leur partie superficielle des propriétés un peu différentes des « vrais » ferrallitiques.

2. CONTRAINTES CLIMATIQUES (DANS LA ZONE DES SOLS FERRALLITIQUES)

Chaque plante possède des exigences climatiques propres avec lesquelles on ne saurait transiger, exigences assez bien connues des agronomes pour l'ensemble des cultures.

Bien que l'on puisse adapter, par sélection génétique par exemple, une plante à des conditions de climat un peu différentes de celles de son habitat d'origine, il n'en reste pas moins une fixicité certaine du matériel végétal à la température, l'ensoleillement, la pluviométrie et leurs répartitions tout au long de l'année.

(1) Un tome spécial de cette série doit traiter de la géographie des sols ferrallitiques.

2.1. LA TEMPERATURE

Les régions équatoriales humides : Situées à des altitudes inférieures à 1.600 m, elles bénéficient normalement de températures relativement constantes comprises entre 15 et 35° Celsius. Elles sont le domaine d'élection des plantes typiquement « tropicales » : cacaoyer, hévéa, palmier à huile, caféier robusta, bananier, manioc, igname...

Par contre, pour diverses raisons (en particulier un parasitisme intense da la part des nématodes du sol), elles sont impropres à ces cultures de légumes (salades, haricots verts, tomates, choux, pommes de terre, etc...) dont sont friandes les populations d'origine européenne.

Les zones tropicales et subtropicales : Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, il y a apparition d'une saison fraîche qui correspond le plus souvent, pour totalité ou partie, à la période sèche. Ce fait, même s'il n'y a pas en même temps de contraintes hydriques, introduit une forte susceptibilité aux maladies cryptogamiques : ainsi, dans le sud-est de l'Etat de Bahia (Brésil), cacaoyers, hévéas, palmiers à huile sont très nettement en état de moindre résistance en juin et juillet, mois les plus froids.

Par contre, d'autres plantes s'en accommodent volontiers et préfèrent même un rythme saisonnier bien différencié incluant des périodes fraîches : c'est le cas du théier (Asie, Etat de São Paulo au Brésil), entre autres.

L'altitude peut jouer le même rôle que la latitude en introduisant un abaissement des températures : le théier, plante subtropicale, est cultivé sous l'équateur au Kenya et au Tanganika au-dessus de 1.000 mètres, alors que son habitat primitif est la Chine. Inversement, le caféier arabica, originaire des hauts plateaux d'Ethiopie (quelques degrés de latitude Nord et deux mille mètres d'altitude), s'adapte parfaitement à des conditions de plaine si la latitude se rapproche de celle des tropiques. Le compromis entre altitude et latitude est particulièrement significatif pour ce caféier dans le continent sud-américain (tableau I.1.).

Que cela soit dû à l'altitude ou à la latitude, l'apparition d'un simili-hiver (sans gel) permet la coexistence de cultures tropicales et cultures tempérées : canne à sucre, caféier arabica et vignobles près de São Paulo au Brésil, blé en altitude dans les Andes (Equateur, Bolivie) et au Kivu (Zaïre). Il peut même y avoir alternance : blé l'hiver, soja l'été dans le Rio Grande do Sul au Brésil.

TABLEAU I.1. — *Le caféier arabica, latitude et altitude en Amérique du Sud*

Localisation	Latitude moyenne	Altitude approximative
Brésil : Etats du São Paulo et du Paraná	22-24° Sud	300-600 m
Brésil : sud de l'Etat de Bahia	15° Sud	900-1100 m
Colombie	2-4° Nord	1400-2500 m

2.2. L'ENSOLEILLEMENT

L'extension géographique des sols ferrallitiques conduit à des conditions variables d'ensoleillement. En régions équatoriales, contrairement à une idée tenace, l'ensoleillement est inférieur à celui des étés tempérés en raison de la forte nébulosité et de l'égale durée des jours et des nuits. Pour cette raison, le riz irrigué est nettement plus productif,

avec 80 quintaux et plus à l'hectare, sur le pourtour du bassin méditerranéen qu'à proximité de l'équateur où une récolte a parfois certaines difficultés à atteindre 40 qx/ha malgré les progrès génétiques (il est vrai que le fait de pouvoir faire plusieurs récoltes par an rétablit l'équilibre).

C'est en partie pour cette raison que la canne à sucre et le cotonnier (outre le riz déjà cité) seront cultivés de préférence dans les zones subtropicales à saisons alternées et à fort ensoleillement. Parfois, même, on « force » des plantes dites d'ombre, comme le cacaoyer ou le poivrier, en supprimant les arbres d'ombrage : on arrive ainsi à augmenter substantiellement les rendements, mais on accroît en même temps la sensibilité de ces cultures à diverses affections.

2.3. LA PLUVIOSITE ET LA REPARTITION DES PLUIES DANS L'ANNEE

Les quantités de pluie que reçoivent les sols ferrallitiques sont très variables suivant leur localisation : de 1.000 mm jusqu'à 10 et 12 mètres (en Assam au nord-est de l'Inde).

Chaque plante a des besoins spécifiques en eau (par exemple un minimum de 1.800-2.000 mm pour l'hévéa, de 1.400 mm pour le caféier robusta, etc...) et ces besoins déterminent dans une certaine mesure les limites de pluviométrie compatibles avec telle ou telle culture.

Naturellement, il s'agit là d'une approximation, car il faut compter aussi avec les propriétés du sol à emmagasiner et à retenir l'eau de pluie pour la restituer ensuite aux cultures (propriétés qui feront l'objet d'un chapitre spécial de cet ouvrage, chap. V), et la répartition des pluies dans l'année qui est le sujet qui nous préoccupe dans l'immédiat.

L'étalement des pluies sur 7 à 8 mois au moins permet le plus souvent deux cycles culturaux dans l'année (par exemple arachides-paddy ou sésame en République Centrafricaine, blé-soja dans le sud du Brésil, etc...). L'expérience prouve qu'il faut une pluviométrie minimale de 1.200 mm pour que les « accidents » climatiques inévitables n'engendrent pas, en conditions ferrallitiques, une fréquence insupportable de déboires sur le cycle cultural le moins arrosé.

La longueur de la saison sèche est, au même titre que la quantité de pluie, un facteur qui conditionne la réussite des cultures. Les plantes pérennes ou à cycle long ont besoin d'une pluviosité bien répartie et d'une saison sèche courte (cacaoyer, caféier, palmier à huile, hévéa, canne à sucre, etc...). Par contre, les plantes à cycle court comme l'arachide se contenteront de 3 à 4 mois de pluie, le cotonnier de 4 à 5 mois. Une donnée à prendre en compte également est *l'intensité de cette saison sèche* : c'est ainsi qu'en République Centrafricaine, on cultive le caféier robusta sur une ligne allant de Berbérati à Bangassou sous une pluviométrie de 1.400 à 1.600 mm environ avec une saison sèche s'étendant de novembre à mars, mais à condition qu'elle soit entrecoupée de quelques pluies en décembre et janvier ; un peu plus au nord, de Bossangoa à Bria, malgré des chutes de pluie identiques, une longueur similaire de saison sèche, cette culture devient très aléatoire pour la simple raison que les petites pluies intermédiaires de saison sèche n'existent plus ; la saison sèche « absolue » y est de règle comme en zones soudanienne et sahélienne.

2.4. LES FACTEURS CLIMATIQUES ET LES RISQUES D'EROSION. L'AGRESSIVITE DES PLUIES

L'une des limitations pour la mise en valeur des sols ferrallitiques provient du risque d'érosion des sols soumis à la culture. On a montré par bon nombre d'études que si les sols ferrallitiques avaient une bonne résistance à l'érosion, par contre le type de précipi-

tations qu'ils reçoivent la facilite grandement. Les pluies tropicales ont certes mauvaise réputation à ce point de vue, mais il est important de pouvoir évaluer avec précision ce risque. L'un des moyens de mesurer cette agressivité de la pluie est le coefficient EI_{30} de Wischmeier. Alors que ce coefficient varie de 50 à 650 aux Etats-Unis, il est de 520 à Bouaké, 860 à Divo, 1.260 à Abidjan (Côte d'Ivoire) et 1.375 à Befandriana à Madagascar (ROOSE, 1973).

Tous les sols ferrallitiques ne sont pas aussi sévèrement affectés : par exemple, ELTZ, COGO et MIELNICZUK (1977) trouvent un EI_{30} de 374 pour le « planalto Riograndense » (en zone subtropicale, il est vrai) au sud du Brésil.

Evidemment, on constate empiriquement que cet indice varie en fonction de l'importance des précipitations : il n'est que de 520 à Bouaké avec 1.200 mm de pluies et un drainage faible (100 mm), mais il atteint en moyenne 1.260 pour des précipitations annuelles de l'ordre de 2.100 mm dans la région d'Abidjan (ROOSE, op. cit.). D'une façon générale, c'est l'intensité horaire de la pluie qui lui donne en gros sa valeur.

Ces mesures d'indice d'agressivité des pluies sont encore assez rares, mais la simple observation visuelle des conditions climatiques auxquelles sont soumises les sols ferrallitiques de par le monde laisse supposer que les indices répertoriés en Côte d'Ivoire ne sont pas exceptionnels, loin de là. On a fait plus haut une comparaison avec les indices mesurés aux Etats-Unis, mais il faut ajouter que le continent nord-américain est victime d'une érosion sans commune mesure (au moins dans certaines régions) avec ce qui se passe dans la vieille Europe.

Dans tous les sols, l'érosion a évidemment comme première conséquence le décapage de l'horizon superficiel, le plus riche, donc une diminution de la fertilité.

Fort heureusement, les sols ferrallitiques présentent normalement de par leurs propriétés physiques une bonne résistance à l'érosion (ROOSE, 1973 ; LAL, 1976 ; WILKINSON, 1975, etc...), mais celle-ci n'est pas suffisante pour parer à tous les aléas climatiques.

2.5. L'AGRESSIVITE GENERALE DU CLIMAT

Les facteurs climatiques auxquels sont soumis les sols ferrallitiques n'engendrent pas seulement une susceptibilité notable à l'érosion. Ils favorisent en outre le départ, par lixiviation, des nutriments nécessaires aux plantes.

Qu'il s'agisse de pluies à peu près réparties tout au long de l'année ou de précipitations concentrées sur les quelques mois les plus humides, un flux d'eau tiède percole à travers les sols, attaquant les derniers minéraux issus de la roche-mère, entraînant en profondeur les éléments nutritifs encore présents, bref appauvrissant petit à petit le sol.

Ce point sera plus largement traité à propos de l'origine des nutriments (chap. VII) et également de leur dynamique en conditions ferrallitiques (chap. VIII et IX). Il était cependant nécessaire d'en dire un mot à propos des contraintes engendrées par le climat pour bien en souligner la cause qui est d'ordre surtout climatique associée à une évolution extrêmement longue des sols.

3. LA TOPOGRAPHIE ET LA SUSCEPTIBILITE DES SOLS A L'EROSION

La topographie introduit un certain nombre de contraintes pour la mise en valeur : d'une part, elle peut morceler à l'excès les surfaces utilisables, ce qui est peu gênant pour

l'agriculture manuelle traditionnelle, mais l'est beaucoup plus dès qu'il s'agit d'introduire un minimum de mécanisation ; d'autre part, la pente, si elle facilite le drainage, devient très vite un facteur important d'érosion.

3.1. LE MICRO-RELIEF

Il s'agit là d'accidents topographiques allant de quelques centimètres à quelques mètres de différences de niveau par rapport à la surface d'ensemble. Les plus fréquents, au moins en Afrique (au nord de l'équateur) et apparemment aussi en certaines régions d'Extrême Orient, sont les carapaces et cuirasses ferrallitiques et les blocs et pierres provenant de la désagrégation de ces mêmes cuirasses. Il s'agit habituellement de phénomènes locaux qui n'intéressent normalement que des superficies restreintes. Mais ils peuvent avoir, sur ce même plan local, une extension très importante comme dans l'est de la République Centrafricaine et le nord du Zaïre, ou encore en Guinée.

Parfois, des plateaux horizontaux constitués de sols ferrallitiques épais (souvent sableux en surface) se trouvent parsemés de légères dépressions ayant plusieurs centaines de mètres de diamètre et de 1 à 4 ou 5 mètres de profondeur, du moins telles qu'on a pu les décrire en Côte d'Ivoire (HUMBEL, 1964) ou sur les Barreiras du Brésil. Conséquence d'un soutirage de matières vers le bas, ces dépressions ont souvent des sols évoluant vers les podzols et, d'un point de vue agricole, constituent des « mouillères » peu propices aux cultures craignant un excès d'humidité.

En forêt, une densité anormale d'excavations provoquées par la chute des arbres (chablis) indique un mauvais ancrage de cette végétation dans le sol par suite d'une pénétration insuffisante des racines, donc une imperméabilité du sous-sol comme cela se produit en Guyane française (BLANCANEAUX, 1973).

Assez souvent, un micro-relief particulier provient de l'action de la faune du sol : c'est le cas des turricules des vers de terre qui parsèment parfois la surface du sol avec une telle densité que la marche en devient pénible ; mais d'autre part, on sait que les vers de terre ne colonisent les sols ferrallitiques que si ces derniers sont bien fournis en nutriments minéraux avec un pH égal ou supérieur à 6 ; les sols « à vers de terre » sont donc généralement des sols « riches ». Plus gênante pour l'agriculture est la présence des grandes termitières épigées : si les termitières cathédrales n'occupent qu'une superficie restreinte, il n'en est pas de même des énormes termitières hémisphériques (jusqu'à 8 à 10 mètres de rayon) si fréquentes en Afrique Centrale (SYS, 1957). L'arasement, toujours coûteux, de ces édifices n'est généralement pas souhaitable : l'emplacement de la termitière reste stérile en raison de sa mauvaise structure et de l'absence quasi-totale de matière organique. En ce domaine, on ne peut dégager aucune règle : si, en Afrique, la terre des termitières est considérée comme pauvre, par contre, dans certaines parties de l'Asie des moussons, on fait de préférence des cultures de tabac et de canne à sucre (plantes ici réputées exigeantes) sur des vieilles termitières abandonnées ou les sols aux alentours ayant reçu des matériaux en provenant (MOORMAN, 1972).

En ce qui concerne l'érosion, le micro-relief des sols ferrallitiques n'a guère d'influence, à part quelques ravinements autour des termitières. Mais on verra au chapitre suivant les conséquences désastreuses du phénomène qui engendre les chablis répétés de Guyane française (Sols à dynamique superficielle de l'eau).

3.2. LE RELIEF GENERAL

Le modelé des sols ferrallitiques provient le plus souvent de la dissection de vastes plateaux par les cours d'eau et du rajeunissement des formes du relief par érosion. On distinguera principalement :

— *des plateaux* : il s'agit souvent de restes d'anciennes surfaces pénéplanées, encore parfois très vastes : plateaux Batékés au Congo, plateau du Kasaï au Zaïre, Adamoua au Cameroun, « tabuleiros » du Brésil, llanos de Colombie et du Vénézuéla, etc... Ces plateaux sont en général peu fertiles (sols sableux ou acides, parfois sableux et acides).

— *des collines en « demi-orange »*, résultat de l'extrême framgentation du relief ; elles caractérisent les zones les plus humides (1.500-2.000 mm de pluies et plus). Les fortes pentes des demi-oranges posent de sérieux problèmes de protection des sols contre l'érosion dès qu'elles sont défrichées.

— *des reliefs à ondulations faibles à modérées*, tombant de façon abrupte sur les cours d'eau : c'est la grande zone des savanes soudano-guinéennes d'Afrique et du Cerrado brésilien. Les anciennes dépressions (comme la cuvette congolaise) ou les plateaux basaltiques du Sud du Brésil et du Paraguay peuvent rentrer dans cette catégorie. Il s'agit là du modelé le plus favorable à l'agriculture.

— *des vallées* : celles-ci sont souvent étroites ou au contraire s'élargissent en marécages (dont les sols ne sont très généralement pas ferrallitiques). Habituellement, la mise en valeur est délicate en raison des risques d'inondation et de la pauvreté fréquente des sols. Mais tous les cas sont possibles, car même de vieilles alluvions en voie de ferrallitisation peuvent porter de belles cultures (Madagascar, Colombie, Brésil...).

3.3. LA PENTE ET LES RISQUES D'EROSION

Dès qu'un sol est en pente, le drainage externe est normalement bien assuré. Par contre, les risques d'érosion apparaissent et croissent en fonction de la pente : érosion en nappe d'abord, puis en rigoles et en ravines, décapant en premier lieu la partie superficielle du sol la plus fertile, et pouvant finalement aboutir aux « Bad Lands » inutilisables, même pour en faire une pature extensive.

Il faut tout d'abord séparer de l'érosion accélérée (1), celle qui nous intéresse, une érosion de type géologique : cette dernière affecte les pentes abruptes des montagnes, les têtes de vallée, les flancs des terrasses alluviales, etc... et son évolution ne peut être stoppée que provisoirement par des travaux de génie civil extrêmement onéreux. En fait, elle a un caractère inéluctable à terme.

Seule l'érosion causée par l'homme dans les terres qu'il exploite est en cause dans ce qui suit.

3.4. LIMITATIONS AGRICOLES IMPOSEES PAR LA PENTE

Degré de pente et limitations agricoles

L'érosion ne se produit pas ou peu sur sols bien couverts de végétation, mais elle se manifeste avec intensité sur les sols cultivés. On a donc recherché les pentes compatibles avec le travail du sol. Le tableau I.2. en donne deux exemples.

---

(1) L'expression « érosion accélérée » est préférée à celle d'« érosion agricole » pour désigner les phénomènes érosifs qui se produisent sur les sols cultivés.

TABLEAU I.2. — *Limitations agricoles en fonction de la pente (en %)*

Degré des limitations agricoles	Brésil (N.E.) (RAMALHO, PEREIRA et BEEK, 1978)	FAO Tropiques humides (SYS, 1978)		
	Cultures annuelles	Cultures annuelles	Cultures pérennes et pâturages	Forêt
Limitation nulle	0-3 %	0-2 %	0-8 %	0-16 %
Limitation faible	3-8 %	2-8 %	8-16 %	16-30 %
Limitation moyenne	8-20 %	8-16 %	16-30 %	> 30 %
Limitation forte	20-45 %	16-30 %	> 30 %	
Limitation très forte	> 45 %	> 30 %		

Il paraît nécessaire d'ajouter à ce tableau quelques explications complémentaires. Les normes brésiliennes se réfèrent directement aux risques d'érosion et au type de travail du sol pour des cultures annuelles :

— 0-3 % : pratiquement pas de risques d'érosion, aucune restriction à la mécanisation,

— 3-8 % : susceptibilité encore faible à l'érosion assez facile à juguler par des pratiques de conservation simples ; emploi du tracteur à réduire un peu,

— 8-20 % : risque d'érosion qui s'accroît mais reste encore modéré ; le sol requiert déjà des mesures de conservation élaborées, donc chères (courbes de niveau, bandes d'arrêt, etc...). Mécanisation à réduire d'au moins 50 % en intensité par rapport à la première catégorie,

— 20-45 % : susceptibilité à l'érosion forte ; les mesures anti-érosives sont techniquement difficiles et presque toujours anti-économiques (banquettes). L'utilisation du tracteur est peu rentable et dangereuse, sauf cas d'espèce,

— > 45 % : très grande sensibilité à l'érosion ; culture et mécanisation sont à déconseiller.

Les normes FAO, citées par SYS (1978) à propos des sols des tropiques humides, délimitent en gros les mêmes catégories que pour le Brésil, mais avec des spécifications plus sévères quant au degré de pente et moins de référence à la mécanisation. Elles ont l'avantage de montrer des tolérances différentes entre cultures sarclées, cultures pérennes, pâturages et forêts.

Facteurs pouvant favoriser ou diminuer l'érosion

Il va sans dire que, si les données citées au tableau I.2. peuvent guider l'aménageur, elles ne constituent en aucun cas des règles à appliquer en toute situation sans examen préalable du sol. Ainsi, une discontinuité pédologique entre un horizon supérieur sableux meuble et un horizon moyen plus argileux nettement moins perméable à l'eau (en milieu ferrallitique, cela concerne le plus souvent des sols appauvris en argile en A) accroît fortement le risque d'érosion. Et ce risque se trouve augmenté lorsque cette discontinuité coïncide à peu près avec la profondeur du labour : toute la couche travaillée peut alors glisser le long de la pente lors de fortes pluies. Au Brésil, ce type de discontinuité fait rétrograder le sol d'une catégorie (un sol de 3-8 % de pente sera alors coté comme s'il avait 8 à 20 % de pente, selon RAMALHO, PEREIRA et BEEK, 1978).

Autre facteur qui favorise beaucoup l'érosion : l'imperméabilité de la surface du sol. Bien souvent, il s'agit d'une imperméabilisation acquise, comme lors de la formation des croûtes de battance. C'est malheureusement un phénomène classique dû à la dégradation

des caractéristiques structurales par quelques cultures successives (MOREL et QUANTIN, 1972). On y remédie provisoirement par des sarclages et plus durablement par le retour à la jachère ou à la prairie (reconstitution de la structure).

Une imperméabilité provenant d'une texture trop lourde (sols très argileux) est en fait assez rare chez les sols ferrallitiques, en raison des structures fort convenables qui caractérisent la plupart de ces sols et qui persistent assez longtemps après la mise en culture.

Mais il ne faut pas oublier qu'une proportion importante de limons et sables fins peut sérieusement limiter l'infiltration en colmatant les pores du sol : c'est le cas en Casamance où la grande susceptibilité à l'érosion (pour cette raison) de sols ferrallitiques sablo-argileux en surface (sols rouges faiblement désaturés) rend difficile la culture de pentes supérieures à 1 % sans une sérieuse mise en défens (culture en courbes de niveau, bandes d'arrêt, banquettes) ; et ces précautions ne permettent pas la mise en valeur de pentes supérieures à 3 % (FAUCK, 1955 ; COINTEPAS, 1956). On est donc loin des normes FAO ou brésiliennes citées plus haut.

Cependant, d'une façon générale, les sols ferrallitiques sont relativement peu sensibles à l'érosion (ROOSE, 1973) malgré l'agressivité de la pluie. Pour diverses raisons — en particulier grâce à une structure superficielle presque toujours pratiquement intacte —, le risque d'érosion est faible la première année qui suit le défrichement, quelle que soit la pente ou presque ! Il s'accroît ensuite très fortement au fur et à mesure que se prolonge le temps de culture.

Un couvert végétal continu évite en fait toute perte en terre (sinon en eau), même lors des fortes averses. A ce point de vue, les cultures pérennes — surtout si une légumineuse de couverture complète la protection — ont une supériorité indéniable sur les cultures annuelles qui, elles, laissent le sol nu ou incomplètement couvert pendant un certain laps de temps.

4. CONCLUSION : L'EROSION ET SA PREVENTION

Ainsi qu'on l'a vu dans ce chapitre, la conséquence la plus immédiate et la plus sensible de l'environnement des sols ferrallitiques dès que l'on essaie de les mettre en valeur est le risque d'érosion. Agressivité des pluies et pentes fréquentes, souvent fortes, des paysages ferrallitiques se conjuguent pour la rendre parfois désastreuse. ROOSE (1967-c) relate des pertes annuelles en terre de 20 tonnes par hectare qui, malheureusement, paraissent assez habituelles dans les cultures d'ignames et de manioc en basse Côte d'Ivoire ; ce départ de matière ne serait peut-être pas par lui-même le fait le plus inquiétant s'il n'affectait la partie la plus riche du sol en le privant de l'équivalent de 3,6 tonnes de fumier de ferme (à 12,3 % de carbone), de 240 kg de dolomie, de 60 kilogrammes de chlorure de potassium (à 60 % de $K_2 0$), de 250 kilogrammes de sulfate d'ammoniaque (à 20 % de N), de 130 kilogrammes de superphosphate (à 18 % de $P_2 0_5$). On croit rêver en détaillant ces composants d'une fumure que bien peu d'agriculteurs des tropiques emploient avec une telle largesse dans leurs champs et qui, dans le cas présent, va rejoindre ruisseaux et rivières en pure perte.

Lorsqu'on parle de prévention de l'érosion, on pense immédiatement : cultures en courbes de niveau, billons isohypses (cloisonnés de préférence), cultures en bandes alternées, bandes d'arrêt, banquettes, terrasses...

Malgré un certain nombre d'exemples, américains surtout, illustrés par de magnifiques photographies produites par les services concernés, il faut se rendre à l'évidence que la plupart des agriculteurs sont bien peu sensibilisés à l'érosion et à ses méfaits, sauf catastrophe évidente. Qui n'a vu en France des ravines cisailler les champs de céréales au cours

des hivers pluvieux, dans l'indifférence, tout au moins apparente, de leurs propriétaires ? Et le même phénomène se produit sur cultures diverses dans le sud du Brésil (cette fois-ci sur sols ferrallitiques) où, pourtant, les « fazendeiros » ne le cèdent guère en technicité à leurs collègues d'Europe. Il faut reconnaître que cultiver une forte pente en suivant les courbes de niveau n'est pas chose aisée avec le matériel lourd moderne (charrues et instruments divers tractés « chassent » dangereusement vers le bas). Confectionner banquettes et terrasses représente un coût élevé, parfois difficilement supportable. Bandes d'arrêt et cultures en bandes alternées sont mieux acceptées, mais se heurtent souvent à la fragmentation de relief, d'où des « tournières » importantes incompatibles avec les dimensions réduites de ces bandes, des rétrécissements et des élargissements qui compliquent le travail à plaisir.

Ce qui est vrai avec les agriculteurs « modernes », au fait des techniques les plus avancées, l'est encore plus avec les paysans des tropiques. Il ne s'agit plus ici de matériel agricole lourd, mais de psychologie élémentaire.

Il est fort difficile de faire saisir au cultivateur africain ou au « campesino » d'Amérique latine l'intérêt d'un aménagement anti-érosif un peu complexe. Il n'y voit souvent qu'une gêne qui dérange ses habitudes. Des quelques expériences, d'ailleurs fort réussies techniquement, réalisées en Afrique, il n'est pas resté grand'chose — et parfois rien du tout — dès qu'a cessé la tutelle (à vrai dire parfois assez pesante) de l'autorité qui avait mis en place ces dispositifs. On a même vu défricher les bandes d'arrêt enherbées, tout simplement parce qu'elles contenaient plus de matière organique que les champs cultivés de part et d'autre !

La lutte contre l'érosion doit donc passer par des moyens simples, facilement accessibles et aisés à mettre en œuvre.

La première précaution consiste à ne pas cultiver des sols trop en pente : les normes figurant dans ce chapitre en donnent une illustration. On a vu également que, même sur fortes pentes, l'érosion en sols ferrallitiques restait modérée en cultures sarclées lors de la première culture après défrichement et qu'elle s'accroît ensuite assez vite. La culture itinérante est donc bien adaptée à la mise en valeur des pentes, à condition qu'elle ne dure pas trop longtemps : cet adverbe recouvre en fait un laps de temps assez court, un an comme chez les indiens de Guyane ce qui serait l'optimum, mais deux années sont généralement possibles sans trop de danger ; une durée plus longue signifie trop souvent, sinon la ruine du sol (sur de fortes pentes), du moins un appauvrissement considérable de sa tranche superficielle. Certains auteurs voient d'ailleurs dans la jachère le moyen le plus économique de réparer les dégâts causés par l'érosion.

Le paillis est un excellent moyen de combattre l'érosion : même d'épaisseur réduite, quelques millimètres, il suffit à éviter un ruissellement générateur d'érosion. Il n'est malheureusement pas fréquemment utilisé en raison de son coût élevé.

En fait, le procédé le plus simple, mais pas toujours le plus facile à mettre en œuvre, est de fournir au sol une couverture végétale épaisse et continue. Une végétation dense et de belle venue, en plus d'autres avantages (par exemple une évapo-transpiration importante qui réduit d'autant la lixiviation des nutriments par les eaux de drainage), limite très fortement l'érosion et parvient même à éviter son apparition.

Dans ce domaine, les plantes pérennes (caféiers, cacaoyers, hévéas, palmiers à huile...), associées à une légumineuse rampante ou non, rétablissent en quelque sorte le climax forestier originel, en principe optimum. L'érosion ne s'y manifeste pas même sur fortes pentes, sauf évidemment s'il y a erreur d'aménagement (ruissellement à partir des chemins, surpaturage).

En cas de cultures sarclées, les précautions à prendre se résument en quelques conseils destinés à assurer rapidement au sol une couverture végétale précoce et fournie :

— Semer tôt, dès les premières pluies, afin de limiter au maximum la période où le sol est quasi-nu ou nu (AKEHURST et SREEDHARAM, 1965 ; MACARTNEY et *al.*, 1970 en Tanzanie ; CHARREAU, 1972 pour l'Afrique occidentale).

— Dans le même but, favoriser la pousse par un haut niveau de fertilisation, au besoin par des fumures organiques et minérales (LE BUANEC, 1972, etc...).

— Eviter les « trous » dans les cultures et surtout les cultures « ratées », les uns et les autres laissant la surface dénudée ; la dénudation est le pire des traitements que l'on puisse infliger au sol.

— En fin de cycle cultural s'efforcer de ne pas laisser le sol exposé aux dernières pluies. C'est un danger démontré en particulier par ROCHE et DUBOIS (1959) à propos de la culture de la pomme de terre à Madagascar, et MARTIN G. (1967) pour l'arachide et diverses plantes dans la vallée du Niari au Congo. Les cultures intercalaires, lorsqu'elles sont compatibles entre elles, peuvent apporter une aide efficace, comme le souligne ANDREWS (1972) qui préconise, à l'imitation des paysans du Nigéria, de semer du sorgho (à cycle long) entre les rangées de mil et de maïs (à cycles courts).

— Choisir, lorsque c'est possible, des plantes sous lesquelles le sol s'érode peu (ROOSE, 1973). Contrairement à la réputation qui lui fut longtemps faite, le riz pluvial ne favorise pas l'érosion plus que les autres plantes sarclées ; au contraire, son réseau de racines fasciculées « tient » la terre. Au cours d'une forte averse, il peut y avoir ruissellement abondant sous riz, mais avec une charge solide faible. Ceci n'est évidemment valable que quelques semaines au moins après la levée, lorsque les plantules ont trente centimètres de hauteur.

Il est plus facile d'énoncer ces principes que d'arriver à les mettre en œuvre année après année. Mais ils fournissent une base solide pour une lutte anti-érosive par des moyens simples.

Dans tout ce chapitre, on a parlé un peu du climat, nettement plus du relief, mais surtout de la conséquence la plus tangible de l'un et de l'autre sur les sols ferrallitiques, c'est-à-dire de l'érosion.

Il est un domaine qui n'a point été abordé ici ; c'est celui des limitations par suite des risques d'inondation. La raison en est simple : sauf cataclysme, ce risque est pratiquement nul pour les sols ferrallitiques qui sont toujours des sols exondés, occupant des positions hautes dans le paysage. On verra plus loin qu'ils peuvent posséder un horizon d'hydromorphie en profondeur, mais cette hydromorphie ne va jamais jusqu'en surface, sinon on n'a plus affaire à un sol ferrallitique.

la profondeur du sol, la différenciation des horizons pédologiques et la pénétration des racines

1. LA PROFONDEUR DES SOLS FERRALLITIQUES, LE SOL UTILE ET LE PROFIL CULTURAL

L'appellation « sols ferrallitiques » recouvre des profils relativement variés mais dont l'ensemble des horizons A B C s'étend à des profondeurs sans commune mesure avec celles des sols tempérés ou méditerranéens : 10 à 20 mètres n'ont rien d'exceptionnel, tandis qu'un mètre est habituellement considéré comme un minimum.

Les végétaux quels qu'ils soient, même les plus exigeants, devraient donc avoir à leur disposition dans ces sols un volume de terre largement suffisant et, dans la plupart des situations, surabondant.

L'agronome et l'agro-pédologue introduisent une autre notion, celle du « sol utile », c'est-à-dire du sol utilisable par les racines des plantes ; la donnée la plus importante en sera évidemment sa profondeur, l'extension latérale n'étant limitée que par la présence de plantes concurrentes.

« Profondeur pédologique » et « profondeur utile » ne coïncident pas nécessairement : par exemple, une roche-mère tendre ou fissurée bien pénétrée par les racines accroît la profondeur du sol utile alors plus épais que le profil pédologique.

Beaucoup plus souvent, c'est l'inverse qui se produit : un accident, une différenciation entre deux horizons dans le profil interdisent aux racines de s'ancrer en profondeur.

Cette notion de « sol utile » peut être précisée, cas par cas, par celle de « profil cultural » faisant expressément référence à la tranche de sol remaniée par l'homme et exploitée par une plante donnée ou une catégorie déterminée de plantes (HENIN, GRAS et MONNIER, 1969).

Ce sera le but de ce chapitre, d'étudier les différents facteurs qui limitent le volume du « sol utile » (et aussi du « profil cultural ») et éventuellement de proposer des remèdes.

2. LA COMPACITE DE L'HORIZON SOUS JACENT

Les sols ferrallitiques présentent bien souvent à faible profondeur (entre 10 et 70 cm) un horizon plus compact dit de « comportement » ou de « consistance » qui peut présenter

une gêne, parfois un obstacle, pour la pénétration des racines des plantes cultivées (CHAUVEL et FAUCK, 1969).

Ainsi, en Casamance, il existe entre 10 et 20 cm de profondeur, un horizon compact, invisible à l'œil nu, que les racines franchissent difficilement (HADDAD et SEGUY, 1972). Même constatation faite au Zaïre (région des Ouellés) où une zone grossièrement structurée entre 40 et 70 cm de profondeur gêne la pénétration des racines de Coffea canephora robusta (FRANKART et CROEGAERT, 1959). Il en est de même dans des sols aussi éloignés les uns des autres que ceux des hauts plateaux de Madagascar (BOURGEAT et AUBERT, 1971) et de l'Etat de Bahia au Brésil (VOLKOFF, 1975).

De tels accidents n'ont rien d'exceptionnel dans les sols ferrallitiques. Un labour profond et un sous-solage remédient très efficacement à ces défauts dans la plupart des cas, bien que la mise en œuvre de ces moyens lourds ne soit pas toujours chose aisée.

Ces horizons ou sous-horizons compacts passent souvent inaperçus lors des prospections pédologiques, en particulier parce que le piétinement et les pressions des instruments aratoires en exagèrent ensuite les caractères de compacité et parfois même les font apparaître (semelle de labour) à tel point que les racines des plantes cultivées ne peuvent y pénétrer (LE BUANEC, 1974 ; de BLIC, 1975). Leur genèse peut, en partie, s'expliquer par la migration de substances humiques solubles dont l'accumulation favorise à faible profondeur une consistance plus forte liée en particulier à la désorganisation de l'arrangement finement grumeleux des horizons B (FAUCK, 1973).

3. LES SOLS A DYNAMIQUE SUPERFICIELLE DE L'EAU

Alors que, pour leur plus grande partie, les sols ferrallitiques se caractérisent par un drainage vertical, on a remarqué en Guyane française que certains sols présentaient à partir de 40 à 80 cm un horizon imperméable à l'eau et aux racines (BLANCANEAUX, 1973). Il semble impossible d'assimiler ce phénomène à celui décrit au paragraphe précédent car il intéresse la totalité de l'horizon B (pratiquement jusqu'à l'horizon d'altération) et interdit, là où il se présente, toute mise en valeur agricole.

Les études faites par BOULET et HUMBEL (HUMBEL, 1978) ont montré qu'au-dessous d'un horizon superficiel — A1, A3 et souvent B1 pour suivre la terminologie classique — à « comportement normal », s'étendait, le plus souvent dès 60 à 80 cm de profondeur, un horizon dit « physiologiquement sec ». En fait, cet horizon contient une certaine quantité d'eau, mais sa porosité fermée et sa compacité lui interdisent des échanges normaux avec le milieu extérieur qu'il s'agisse du transit et du stockage des eaux de pluies (qui ne se font pas) ou de l'alimentation des racines des plantes qui d'ailleurs n'y pénètrent guère. D'où un régime hydrique tout à fait particulier d'écoulement superficiel (ruissellement et risques d'érosion) et subsuperficiel avec nappe perchée et poches d'eau.

De tels sols existent fréquemment sur certaines formations géologiques (schistes de Bonidoro par exemple) de Guyane française. Il est probable qu'ils débordent au Surinam, mais on ignore s'ils affectent la Guïana, le Venezuela et l'Amazonie brésilienne. Leur mise en évidence se révèle délicate sur le terrain, du moins en période sèche (aspect identique à celui des sols ferrallitiques « normaux »). Il s'agit pourtant d'un problème d'une extrême importance, car tout essai de mise en valeur de ces sols à dynamique superficielle de l'eau risque de se solder — et s'est trop souvent soldé dans le passé — par un échec total.

Fort heureusement, ils coexistent avec des sols à dynamique hydrique verticale, donc parfaitement aptes à porter des cultures, dont un spécialiste averti sait maintenant les séparer.

4. PRESENCE D'UN HORIZON HYDROMORPHE A FAIBLE PROFONDEUR

Les sols ferrallitiques possèdent souvent un horizon d'hydromorphie temporaire et parfois d'hydromorphie permanente dans beaucoup de régions à drainage imparfait ; c'est un cas fréquent en Afrique occidentale et centrale, en Amazonie etc... Le plus souvent ces horizons se trouvent à plusieurs mètres de profondeur et ne gênent en rien les cultures.

Il arrive toutefois que l'horizon d'hydromorphie temporaire soit proche de la surface et provoque ainsi un engorgement passager vers 30 ou 40 cm de profondeur. Si la plupart des plantes annuelles (sauf le cotonnier) supportent parfaitement cette situation, il n'en est pas de même pour beaucoup de plantes perennes : le caféier robusta exige au minimum 60 cm de sol sain (FRANKART et GROEGAERT, 1959), le pyrèthre 70 cm (DELHAYE, 1968), le théier 120 cm (BONTE, 1967) (1), l'hévéa 75 cm au moins et plus d'un mètre si possible (NG SIEW KEE, 1968, CHAN et PUSHPARAJAH, 1972) etc... Par contre, le bananier (Musa sinensis) admet volontiers une certaine hydromorphie à partir de 25 à 30 cm de profondeur, tandis que la variété gros Michel demande environ 75 cm de terre non engorgée d'eau.

Il serait faux de penser qu'un engorgement temporaire ou prolongé du sol ne constitue qu'un obstacle mécanique qui gêne l'enracinement des plantes sensibles à l'hydromorphie. Il peut parfois s'y ajouter des troubles graves dans la physiologie de la plante, comme FORESTIER (1964) l'a montré pour le caféier robusta en République Centrafricaine ; l'hydromorphie provoque chez cet arbuste une carence en potassium associée à une absorption à doses toxiques de magnésium et de sodium.

Un drainage artificiel peut évidemment assainir le milieu, mais, en pratique, on s'efforce de choisir des sols convenables.

5. PRESENCE D'UNE NAPPE DE GRAVATS

Les nappes de gravats sont extrêmement répandues dans les sols ferrallitiques remaniés. Elles sont formées par des gravillons ferrugineux ou des graviers de quartz à angles vifs ou encore par un mélange de ces deux éléments. Outre la réduction du volume de terre utilisable et de l'eau utile qu'ils entraînent (WESSEL, 1971), ces horizons graveleux représentent un obstacle mécanique à la pénétration des racines dans différents cas.

5.1. EPAISSEUR DE L'HORIZON GRAVELEUX

On considère généralement qu'une nappe de gravats de moins de 25 cm d'épaisseur n'a que peu d'importance pour les racines qui la traversent assez aisément, et ceci apparemment quelle que soit la densité des graviers (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958).

---

(1) En fait le théier supporte mieux que certaines plantes, hévéa par exemple, une hydromorphie temporaire à faible profondeur ; par contre la qualité du thé produit s'en ressent fortement.

5.2. PROFONDEUR DU TOIT DE L'HORIZON GRAVELEUX

La présence d'une nappe de gravats, même épaisse de plus de 25 cm, est acceptable pourvu qu'elle soit située :

- à plus de 60 cm pour le caféier robusta (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958)
- à plus de 70-80 cm pour l'hévéa en Malaisie (CHAN et PUSHPARAJAH, 1972)
- à plus d'un mètre pour le cacaoyer.

En général, on fait une distinction entre les plantes à racines fasciculées donc à enracinement superficiel comme le bananier et la plupart des plantes annuelles qui supportent très facilement la présence d'un horizon graveleux à 30 ou 40 cm, et les plantes à pivot, à enracinement profond (cacaoyer, caféier, hévéa etc...) qui ont besoin d'une profondeur de sol beaucoup plus importante.

5.3. DENSITE DES GRAVILLONS

Ainsi, la présence de graviers (gravillons ferrugineux et quartz) peut être un facteur rédhibitoire pour la pénétration des racines dans le sol. Pour évaluer cet inconvénient potentiel, il faut aussi tenir compte de leur abondance par rapport à l'ensemble du sol (constituants grossiers et terre fine), c'est-à-dire de leur densité. Un certain nombre d'observations convergentes permettent de fixer vers 50 % par rapport au poids du sol, soit à environ 75 % par rapport à son volume, une limite à partir de laquelle les racines rencontrent de très grandes difficultés à pénétrer à l'intérieur de cet horizon et à s'y développer et souvent n'y pénétrent pas. Évidemment, on peut déceler quelques variantes en fonction de la nature des plantes.

C'est ainsi qu'un pourcentage volumique de 70 à 80 % de gravillons ferrugineux est éminemment préjudiciable à l'enracinement du caféier robusta au Nord du Zaïre (FRANKART et GROEGAERT, 1959) ; toutefois, en Côte d'Ivoire, on admet que ce caféier arrive à supporter jusqu'à 60 % et 65 % (en poids) de gravillons à la condition que la terre fine ait plus de 40 % d'argile et limon (DABIN, 1964) ; avec plus de 80 % (en volume) de gravillons dans les cinquante premiers centimètres du sol, les racines de la canne à sucre pénètrent très mal en profondeur à Formose (YANG, 1969) ; l'hévéa paraît plus accommodant, car CHAN HEUN YIN et *al.* (1977) constatent, en Malaisie, qu'il arrive à pousser avec 75 % (en volume du sol) de gravillons, mais alors réagit par une diminution appréciable de sa production de latex. Le cacaoyer plus sensible, ne peut admettre plus de 50 % en poids (soit environ 75 % en volume) (1) de graviers par rapport à l'ensemble du sol (DABIN, op. cit.).

On a moins de renseignements pour les plantes annuelles, surtout en ce qui concerne les cultures vivrières dites traditionnelles : en effet, un horizon d'au moins 10 à 20 cm d'épaisseur, où la terre fine domine largement en pourcentage les gravillons, surmonte très généralement la nappe de gravats (on peut ajouter que les paysans évitent habituellement de défricher les sols uniquement composés de gravillons dès la surface). Cette tranche de sol meuble suffit pour beaucoup de cultures (arachide, sésame, paddy, maïs, courge) ; par contre, les plantes à tubercules comme le manioc et surtout l'igname s'en contentent

(1) La correspondance poids-volume indiquée ici résulte d'une confrontation entre les travaux de divers auteurs. Son apparente contradiction (les graviers sont plus lourds que la terre fine) provient vraisemblablement du mode d'appréciation des gravillons, estimation sur le profil pour le volume, pesée sur l'échantillon pour le poids.

difficilement et ont besoin d'un sérieux buttage pour prospérer. Cette restriction faite, il apparaît que, comme pour les plantes pérennes, la limite de 50 % pondérale ou 75 % volumique est également valable pour l'enracinement des plantes annuelles (LEVEQUE, 1978).

On doit ajouter que ces normes furent établies à propos des nappes de gravillons ferrugineux ; lorsqu'il s'y mêle une importante proportion de graviers de quartz, il importe de les abaisser de quelques points (vraisemblablement de 5 à 10 points en volume).

En outre, les éléments grossiers ayant, entre autres effets, celui d'abaisser la teneur en eau utile du sol, plus le climat est sec et s'écarte des conditions optimales requises pour la plante, plus il faudra être sévère dans l'application des normes précitées. Inversement, sous les climats à pluviosité bien répartie, on peut être un peu moins strict dans leur application.

On retrouve donc, ici, l'interdépendance entre plusieurs facteurs qui déterminent la « *fertilité* » d'un sol.

5.4. LE SOUS-SOLAGE DES GRAVILLONS ET SES EFFETS SUR LES CULTURES

Est-il possible de surmonter cet obstacle pour les racines que représentent les gravillons ? Au fond, ils n'introduisent dans le sol qu'une sorte de compacité — d'un caractère un peu particulier il est vrai— et on a l'habitude de briser la compacité du sol par des façons culturales, et celle du sous-sol par le sous-solage. Evidemment, cette opération demande des moyens mécaniques souvent hors de portée avec les possibilités financières des paysans. Mais il y a plus grave : le sous-solage est à peu près inopérant sur les gravillons. LE BUANEC (1974) a relaté en détail les résultats d'un sous-solage effectué dans un sol de Ferkessoudou (Côte d'Ivoire) comportant 70 % de gravillons entre 20 et 70 cm de profondeur (surtout des gravillons ferrugineux, mais aussi quelques graviers de schistes) : à la suite du passage d'un corps sous-soleur tenu par étançon, on obtint, suivant le cas, soit une galerie restant intacte (avec des parois lissées et comprimées), soit un ameublissement net sur un dièdre de 5° à partir de la base. Bien que la porosité de la partie atteinte par la sous-soleuse passât de 38 % à 46 %, les rendements des cultures annuelles, maïs, riz pluvial et cotonnier, ne manifestèrent aucune progression. En outre, l'effet sur le sol disparût très vite :

— sur 40 % des points observés au bout de 8 mois,

— sur 66 % des points observés au bout de 12 mois,

— sur 70 % des points observés au bout de 24 mois.

Non seulement ceci confirme que le sous-solage dans les gravillons est souvent inutile pour les plantes annuelles, mais montre que pour les plantes pérennes — qui, théoriquement, devraient en bénéficier largement — c'est une opération économiquement sans intérêt.

Tout ceci confirme, en les précisant, des observations faites depuis longtemps.

5.5. RECAPITULATION

On peut conclure ce paragraphe sur l'importance d'un horizon ou sous-horizon graveleux dans un profil en disant que l'enracinement des plantes cultivées n'est pas affecté, tout au moins dans des proportions notables, et quelle que soit la culture envisagée, sous trois conditions indépendantes les unes des autres :

— qu'il ne dépasse pas 25 centimètres d'épaisseur,

— que son « toit » se situe à une profondeur supérieure à celle du profil cultural requis, soit en gros à plus de 60 à 80 cm pour les plantes à enracinement profond, en premier lieu, les plantes pérennes (le cacaoyer exige un mètre et de préférence un peu plus), et à 20 à 30 cm pour les cultures annuelles à enracinement superficiel.

— qu'il comporte moins de 50 % de gravillons par rapport au poids total du sol.

6. HORIZONS INDURES, CARAPACE, CUIRASSE

Les phénomènes de carapacement et cuirassement sont trop connus dans les sols ferrallitiques pour qu'il soit besoin d'insister sur leur importance.

En résumé, on peut dire que cuirasses et carapaces situées à un mètre et plus ne présentent généralement pas d'inconvénient pour les cultures, à condition qu'elles n'engendrent pas d'hydromorphie par engorgement des horizons qui les surmontent.

Toutefois, les sols ferrallitiques sont toujours riches en hydroxydes de fer et d'alumine : à la suite d'un dessèchement considérable du sol, les hydroxydes se transforment irréversiblement en oxydes, lesquels peuvent alors cimenter des éléments grossiers. Ce processus intervient parfois dans les horizons superficiels riches en gravillons, déjà érodés et laissés nus plusieurs années (à la suite d'une très lente installation de la jachère naturelle par exemple). La présence de blocs indurés gêne alors considérablement la mise en culture et les façons culturales.

7. PRESENCE D'UN HORIZON D'ETRANGLEMENT CHIMIQUE. LA BARRIERE CHIMIQUE

Dans certains sols ferrallitiques désaturés à réaction acide (pH généralement inférieur à 5), les racines des plantes se contentent d'exploiter la partie superficielle du sol — le plus souvent l'horizon travaillé — sans pénétrer en profondeur. Et pourtant aucun obstacle mécanique ne semble s'y opposer. L'extrême pauvreté de ces sols a conduit à rechercher la cause de ce phénomène parfois dans une carence en phosphore ou plus souvent en calcium (VAN WAMBEKE, 1971, pour le Campo Cerrado brésilien).

Les travaux américains (Mc LEAN et *al.*, 1958 ; KAMPRATH, 1972) amènent à incriminer en premier lieu l'aluminium échangeable. Complexé en surface par la matière organique ou neutralisé par les cendres végétales ou les amendements, cet élément subsiste en profondeur à doses toxiques. Jusqu'à présent le seul moyen pratique de briser — partiellement — cette « barrière chimique » est d'incorporer en profondeur calcaire et dolomie (SOARES et *al.*, 1975 ; GONZALES et *al.*, 1976).

Il s'agit là d'un problème qui relève surtout de la chimie des sols et qui donc sera repris ultérieurement (chapitre X, p. 222-223). Mais en raison de son importance, il paraît utile de le mentionner dans ce chapitre consacré aux conditions de pénétration des racines dans le sol.

8. CONCLUSION : LIMITATIONS CULTURALES EN RELATION AVEC LA PROFONDEUR DU SOL UTILE

Ainsi qu'on l'a vu dans tout ce chapitre, la profondeur du sol utile, c'est-à-dire facilement exploitable par les racines, peut être limitée par un certain nombre de caractéristiques : une compacité trop forte des horizons de subsurface, une hydromorphie à faible profondeur (de nombreuses plantes la redoutent), un pourcentage et une épaisseur inacceptables de gravillons, la présence de cuirasse ou carapace représentant un « goulot d'étranglement physique », (notion que l'on peut compléter, comme on le verra plus loin au chapitre X, p. 222, par celle de « goulot d'étranglement chimique ») très préjudiciable au développement des racines.

Le sol remplit une triple fonction : l'ancrage des végétaux par leurs racines, la fourniture de nutriments minéraux et le stockage de l'eau indispensable à la croissance. On trouvera sur le tableau II.1. les profondeurs minimales requises par plusieurs plantes ou catégories de plantes. Il est évident qu'un sol nettement plus profond qu'indiqué conviendra encore mieux à la culture. Les racines peuvent en effet explorer un volume de sol sensiblement plus important que ce que l'on pense habituellement : on imagine aisément que beaucoup d'arbres enfoncent un long pivot dans le sol (encore que 80 % de leurs racines se trouvent dans les 30 cm superficiels), mais on sait moins que des graminées, comme le blé, la canne à sucre, le *Pennisetum* peuvent émettre des racines parfois jusqu'à 5 et 6 mètres de profondeur ; ces racines contribuent peu à l'alimentation minérale mais font office de pompe en période de sécheresse. Le cas de la canne à sucre est exemplaire : cette plante se contente à la rigueur de 20 à 30 cm d'épaisseur de terre grâce à son réseau de racines fasciculées, mais si d'autres racines peuvent pénétrer à quelques mètres de profondeur, la canne montre une résistance à la sécheresse sans commune mesure avec ce qui se passe dans le premier cas.

TABLEAU II.1. — *Profondeurs minimales en centimètres de sol compatibles avec la culture.*

Types de plantes cultivées	Minimum absolu (Limitation moyenne à forte)	Minimum souhaitable (Limitation faible à nulle)
Plantes annuelles à racines fasciculées : riz (pluvial), maïs, sorgho, arachide, haricots, courges, sésame etc...	15 à 20 cm	40 cm
Plantes annuelles à rhizome et tubercules : manioc, igname, tarot, pomme de terre	30 cm	50 cm
Bananier *(Musa sinensis)*	30 cm	50 cm
Cotonnier et plantes annuelles à pivot	40 cm	60 cm
Canne à sucre	30 cm	80 cm
Caféier, palmier à huile, cocotier	60 cm	100 cm
Cacaoyer, théier	80 cm	120 cm
Hévéa	75 cm	100 cm

Les indications portées sur le tableau II.1. sont forcément schématiques et exigent quelques mots de commentaires.

Une profondeur de sol utile de 15 cm n'est acceptable, même pour des plantes annuelles, que si les racines peuvent pénétrer, au moins un petit peu, dans l'horizon sous-jacent

comme c'est le cas dans les sols peu profonds sur nappes de gravats très denses : ce n'est pas une situation satisfaisante, mais on s'en contente dans des pays comme la Haute-Volta où la fréquence des nappes de gravillons ferrugineux oblige à cultiver de tels sols. A noter que 25 cm correspondent à la profondeur souhaitable de travail du sol, quoique souvent on admet 8 à 10 cm à la bêche (ou à la charrue). Si le sous-sol est compact et dur, comme pour les sols sur cuirasse ferrallitique d'Afrique centrale, une épaisseur de 30 centimètres de terre arable représente vraiment un minimum.

Il faut également tenir compte des réactions de la plante : les espèces à tubercules, par exemple ignames, pommes de terre, manioc, etc., ont besoin au moins de 30 cm à 40 cm de terre très meuble ; mais il n'est pas toujours indispensable de leur réserver automatiquement les sols les plus profonds, on pourra aussi les cultiver sur buttes ou billons.

Si les racines peuvent pénétrer profondément dans un horizon C formé d'une roche très fortement désagrégée par strates ou par veines, on devra considérer comme sol utile toute cette tranche de sol malgré une pierrosité parfois forte. Paradoxalement, une telle configuration du sous-sol est souvent favorable : réserves d'eau importantes, roche-mère à peine désagrégée donc approvisionnement facile en nutriments minéraux... !

En outre, le bon sens indique qu'il faudra être beaucoup plus exigeant, quant aux profondeurs des sols, en climat à pluviosité insuffisante ou irrégulière que lorsque les précipitations sont régulièrement réparties pendant toute la saison des cultures. L'exemple de la canne à sucre cité un peu plus haut est particulièrement significatif à cet égard.

SYS (1978) a établi une échelle très générale de limitations culturales (tableau II.2.), destinée aux prospecteurs œuvrant sous les tropiques humides, donc valable également pour les sols ferrallitiques.

TABLEAU II.2. — *Limitations culturales et profondeur du sol utile d'après SYS (1978)*

Profondeur en cm / Groupe de cultures	Degré de limitation				
	nulle	faible	moyenne	forte	très forte
Céréales et paturages	> 90 cm	50-90 cm	20-50 cm	10-20 cm	< 10 cm
Cultures annuelles de tubercules	> 90 cm	60-90 cm	40-60 cm	10-40 cm	< 20 cm
Plantes pérennes à enracinement profond	> 150 cm	90-150 cm	60-90 cm	30-60 cm	< 30 cm

On pourra peut-être trouver que cette échelle est bien exigeante pour la catégorie « limitation nulle » et un peu laxiste pour la catégorie « limitation très forte ». L'explication en réside pour une part dans le fait que ces normes sont valables, en principe, pour tous les types de sol des tropiques, et sous des conditions climatiques qui peuvent inclure une saison sèche assez dure. Quant à la limitation « très forte », elle concerne bien sûr des sols qu'il est formellement déconseillé de mettre en valeur. Il ne faut pas oublier aussi que pour SYS (op. cit.), limitation nulle signifie une récolte potentielle maximale, limitation faible 85 à 98 % de cette récolte, limitation moyenne 60 à 85 %, limitation forte 45 à 60 % et limitation très forte moins de 45 %. Il y a donc dans ces appellations une grande rigidité — qui n'existe évidemment pas pour le tableau précédent — rigidité qui peut expliquer également certaines différences d'interprétation.

Naturellement, ceci n'exclut pas de dresser des échelles de contraintes pour une plante particulière dans un environnement déterminé. Ainsi, CHANG HEUN YIN *et al.* (1977) ont codifié pour la Malaisie, comme indiqué sur le tableau II.3., les limitations en hévéaculture engendrées par une profondeur insuffisante de sol homogène, qu'il soit limité par un horizon compact durci en carapace ou formé de roches intactes.

TABLEAU II.3. — *Limitations culturales et profondeur du sol utile pour l'hévéaculture en Malaisie d'après* CHANG HEUN YIN *et* al. *(1977)*

Limitations culturales	Profondeur du sol
Sans limitations (very favorable)	Profondeur supérieure à 100 cm
Limitation faible à moyenne (minor limitations)	Profondeur comprise entre 60 et 100 cm
Limitation forte (serious limitation)	Profondeur comprise entre 25 et 60 cm
Limitation très forte (very serious limitations)	Profondeur inférieure à 25 cm

On est moins strict en Côte d'Ivoire où l'on plante parfois des hévéas sur des sols à gravillons (dont la densité à vrai dire est le plus souvent assez faible), qui sont concrétionnés en carapace vers 60 centimètres ; cela ne veut évidemment pas dire qu'il s'agisse de conditions optimales, mais correspond en fait à la « minor limitation » de CHANG HEUN YIN et *al.* (op. cit.). Si d'autres facteurs (pluviosité et répartition des pluies, texture de la terre fine, richesse chimique...) sont à leur optimum pour l'hévéa, il est fort possible que la profondeur du sol ait moins d'importance dans ces conditions.

Ceci montre, s'il en était besoin, qu'aucune donnée ne revêt un caractère « absolu » ou « intangible ». En définitive, c'est le bon sens du pédologue, de l'agronome et de l'agriculteur qui doit trancher.

Quoi qu'il en soit, la lecture de ces divers tableaux révèle une bonne concordance d'ensemble.

les constituants du sol

éléments grossiers et terre fine

1. DEFINITION

Lorsque l'on examine le profil d'un sol, on s'aperçoit au premier coup d'œil qu'il comporte deux types de matériaux, d'une part des graviers, pierres, cailloux et blocs et d'autre part, de la terre qui coule entre les doigts tant que ses agrégats ne présentent pas une cohérence d'ensemble trop grande ; de toute façon, la différence de nature entre chacune de ces deux catégories ne permet aucune confusion.

On fait un tri au laboratoire d'une façon quelque peu arbitraire, mais adoptée dans le monde entier : après un broyage doux qui, en principe, laisse intact ce qui n'est pas terre, on passe l'ensemble au tamis à mailles de 2 mm. Tout ce qui traverse le tamis représente la « terre fine tamisée à 2 mm » ; quant au reste, on le qualifiera ici d'éléments grossiers ou refus au tamis de 2 mm.

1.1. LES CONSTITUANTS GROSSIERS

Ceux-ci comprennent diverses catégories dénommées graviers, cailloux, pierres et blocs, avec parfois des subdivisions : granules pour les petits graviers, petits cailloux et gros cailloux, etc. Les dimensions respectives varient quelque peu selon les divers auteurs. (Tableau III.1.)

TABLEAU III.1. — *Diamètre des constituants grossiers du sol*

Auteurs	BOYER (1) (1971)	SYS (1978)	MAIGNIEN (1980)
Graviers et gravillons	2 mm à 2 cm	2 mm à 2,5 cm	2 mm à 2 cm
Cailloux (gros cailloux)	2 cm à 20 cm (5 cm à 20 cm)	2,5 cm à 7,5 cm	2 cm à 7,5 cm
Pierres	20 cm à 50 cm	7,5 cm à 25 cm	7,5 cm à 20-25 cm
Blocs	> 50 cm	> 25 cm	> 25 cm

(1) D'après une enquête effectuée auprès des pédologues francophones.

On y ajoute souvent les « roches » qui sont de gros blocs fortement ancrés en profondeur dans le sol.

Si les normes de SYS et MAIGNIEN paraissent assez directement inspirées de celles de l'U.S.D.A., il faut ajouter que les pédologues francophones ont l'habitude de subdiviser leur importante classe des cailloux en « petits cailloux » de 2 cm à 5 cm de diamètre et en « gros cailloux » de 5 cm à 20 cm, cette dernière catégorie rentrant évidemment, pour une grande part, dans les « pierres » des deux autres auteurs.

Il est évident que le prospecteur évalue ou, au mieux, mesure et compte blocs, pierres et cailloux présents à la surface du sol (pour autant qu'il ne soit pas trop gêné par la végétation) et apparents sur le profil et la terre de déblai. Il est évident aussi que cette estimation n'est jamais ni très rigoureuse ni exhaustive. Sauf cas particulier, il ne prélève que terre fine, gravillons et parfois petits cailloux ; et chacun sait que, par tendance naturelle inconsciente, il tend à privilégier la première catégorie.

1.2. LA TERRE FINE ET LA TEXTURE DU SOL

Cette terre fine, en réalité composée d'agrégats (plus ou moins brisés par le broyage qui a précédé le tamisage), est décomposée en ses éléments constitutifs par les procédés, bien connus de tous les analystes, de l'analyse mécanique appelée aussi analyse granulométrique. Le *système de référence* est celui de l'Association Internationale de la Science du Sol (I.A.S.S.) :

Argile	0-2 microns
Limon	2-20 microns
Sables fins	20-200 microns
Sables grossiers	200-2000 microns.

Les français introduisent souvent une classe supplémentaire de 20 à 50 microns nommée, suivant le cas, limon grossier ou sables très fins.

Les américains (U.S.D.A.) prennent plus de liberté avec le système international : ils dénomment limon (silt) toute la fraction comprise entre 2 et 50 microns et ils subdivisent les sables en sables très fins (50-100 microns), sables fins (100-250 microns), sables moyens (250-500 microns), sables grossiers (500-1000 microns), sables très grossiers (1000-2000 microns).

Quoi qu'il en soit, le limon (2-20 microns) est le plus souvent fort mal représenté dans la majorité des sols ferrallitiques (moins de 5 % de la terre fine, souvent 1 à 3 % (1), de telle sorte qu'on le néglige pour ne retenir que les proportions de sables et d'argile dans les dénominations de la texture (sols sableux, sablo-argileux, argilo-sableux, argileux).

Le seul processus vraiment délicat de l'analyse granulométrique est la dispersion qui permet de libérer l'argile : celle-ci se trouve souvent enrobée par des sexqui-oxydes de fer et d'aluminine dans des pseudo-particules (de la taille du limon et des sables fins) si résistantes que les dispersants les plus énergiques (pyrophosphate de soude) n'en arrivent pas toujours à bout ; il faut alors utiliser les ultra-sons.

On peut légitimement se demander s'il est bien nécessaire, pour connaître les propriétés texturales d'un sol, de briser ces pseudo-particules qui existent bel et bien dans le sol, y ont un rôle important reconnu depuis longtemps (CASTAGNOL, 1934), quoique fort peu étudié. Le fait de ne pas les prendre en considération peut fausser quelque peu les jugements portés sur les caractéristiques physiques et hydriques des sols (TERCINIER, 1969).

Malheureusement, aucun consensus ne s'est jamais dégagé pour l'adoption d'un test propre à remplacer l'analyse mécanique. Et il y a un argument extrêmement puissant en faveur de ce processus analytique : les laboratoires des sols du monde entier utilisent des

(1) Des proportions importantes de limon en sols ferrallitiques résultent bien souvent d'une dispersion insuffisante avant la séparation en fractions granulométriques.

méthodes, sinon absolument identiques, du moins tellement voisines que les résultats obtenus sont comparables entre eux. Le fait mérite d'être signalé.

La texture des sols est un facteur qui fut et est encore très étudié pour lui-même par les pédologues et agronomes et de plus en plus, surtout, parce qu'il induit un certain nombre de propriétés qui, elles, conditionnent la fertilité des sols. Et il y a fort à parier qu'elle le sera encore longtemps par le moyen de l'analyse mécanique.

2. LA CHARGE DU SOL EN ELEMENTS GROSSIERS (GRAVIERS, CAILLOUX, PIERRES, BLOCS) ET LES CONTRAINTES QU'ELLE INTRODUIT

La présence d'éléments grossiers, graviers, cailloux, pierres, blocs, n'est pas nécessairement un inconvénient majeur dans tous les cas ; ils peuvent former un « mulch » naturel qui diminue l'évaporation et ralentit l'érosion en fragmentant l'écoulement superficiel. Mais très abondants en surface, ils représentent une gêne pour la mécanisation en accélérant l'usure des pièces aratoires, occasionnant le bris des outils et, à la limite, en empêchant le passage des machines. En culture manuelle, ces inconvénients sont très atténués.

Situés à faible profondeur, ils diminuent le volume du sol utile et en particulier la réserve en eau utilisable par les racines.

2.1. LIMITATIONS AGRICOLES POUR LES ELEMENTS GROSSIERS SITUES EN SURFACE

Les limitations, introduites par la présence d'éléments grossiers dans la partie superficielle arable du sol, sont surtout importantes dans le cas de culture mécanisée, beaucoup moins s'il y a culture manuelle (tableau III.2.).

TABLEAU III.2. — *Limitations agricoles introduites par les éléments grossiers de la couche arable en zone équatoriale humide (SYS, 1978)*

Eléments grossiers % du volume du sol	Graviers 2 mm - 2,5 mm	Cailloux 2,5 cm - 7,5 cm	Pierres 7,5 cm - 25 cm	Blocs >25 cm
Limitations en culture mécanisée				
0-3	nulle	nulle	nulle	nulle à faible
3-15	nulle	faible	faible	modérée
15-40	faible	modérée	modérée	forte
40-75	modérée	forte	forte	très forte
>75	forte	très forte	très forte	très forte
Limitations en culture manuelle				
0-3	nulle	nulle	nulle	nulle
3-15	nulle	nulle	nulle	faible
15-40	nulle	faible	faible	modérée
40-75	faible	modérée	modérée	forte
>75	modérée	forte	forte	très forte

2.2. LIMITATIONS POUR LES ELEMENTS GROSSIERS SITUES EN PROFONDEUR

En ce domaine, un problème domine tous les autres, celui de la nappe de gravats (« stoneline » en anglais), composée le plus souvent de gravillons ferrugineux, parfois d'un mélange de gravillons ferrugineux et quartzeux (les graviers de quartz seuls sont assez rares).

L'échelle de SYS (1978) combine teneur en gravillons et profondeur du toit de la nappe de gravats (tableau III.3.).

TABLEAU III.3. — *Limitations dues aux gravillons ferrugineux d'après SYS (1978)*

Gravillons % du volume du sol	Profondeur du sommet de la nappe de gravats en cm	Limitations	
		Plantes annuelles	Plantes pérennes
3-15	20-50	nulle	faible
	50-80	nulle	nulle
	80-100	nulle	nulle
15-40	20-50	faible	moyenne
	50-80	nulle	faible
	80-100	nulle	nulle
40-75	20-50	moyenne	forte à très forte
	50-80	faible	moyenne
	80-100	nulle	faible
> 75	considéré comme limitant le sol utile dans tous les cas		

Les gravillons ferrugineux ne sont pas seuls en cause dans le sol : ils sont entourés de terre fine, dont les propriétés ont également une répercussion sur la fertilité ; c'est pour cette raison que DABIN (1964) prend en compte, pour toute la zone explorée par les racines, le pourcentage en gravillons et la teneur du sol en argile et limon (0-10 μ), ces deux facteurs conditionnant en grande partie les réserves en eau du sol (tableau III.4.).

TABLEAU III.4. — *Pourcentage pondéral (1) de gravillons, teneurs en éléments fins du sol et limitations agricoles qui en résultent, d'après DABIN (1964)*

Gravillons % du poids du sol (1)	Argile + limon % du poids du sol	Limitations
0-10	> 12	nulle
	< 12	moyenne
10-40	> 40	faible
	< 40	moyenne
40-50	> 40	moyenne
	< 40	forte
		50 % de gravillons est la limite pour le cacaoyer dans tous les cas
50-60	< 40	très forte
	> 40	forte
		ne convient plus que pour quelques plantes (caféiers)
> 60		très forte
		obstacle à la pénétration des racines

(1) La correspondance poids-volume des gravillons pour une même « limitation » est mauvaise entre les deux auteurs cités ici probablement pour les raisons indiquées dans la note infrapaginale de la page 16.

En pratique, les gravillons n'introduiront à peu près aucune contrainte, sinon légère, sous trois conditions indépendantes les unes des autres :

— que la profondeur de la nappe se trouve à plus de 40 cm pour les cultures annuelles et à plus de 80 cm — 1 mètre pour les cultures pérennes ;

— que la densité des gravillons ne dépasse pas 40 % en poids (60 % en volume) du sol ;

— que l'épaisseur de la nappe ne soit pas supérieure à 25 cm (les racines la traversent alors aisément quelle que soit sa densité).

On peut noter, en guise de conclusion, que ce problème des gravillons revêt une telle importance dans bon nombre de sols ferrallitiques qu'il a paru nécessaire de l'évoquer déjà au chapitre précédent (chapitre II., p. 15 à 18).

3. LES TEXTURES ET LES PRINCIPALES PLANTES CULTIVEES

Un grand nombre d'auteurs ont étudié les textures qui conviennent le mieux aux plantes cultivées. En se limitant aux pays francophones, on peut citer les cultures suivantes : cotonnier (LATHAM, 1971), riz pluvial (HADDAD et SEGUY, 1972), arachides (BRUGIERE, 1954 ; MARTIN G., 1959), caféier et cacaoyer (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958 ; DABIN, 1964 ; FRANKART et GROEGAERT, 1959 ; FORESTIER, 1959 ; MOULINIER, 1962), bananier (DUGAIN, 1960-a ; DABIN et LENEUF, 1960), etc.

De ces travaux, on peut tirer la conclusion que la texture n'a pas une importance primordiale pour la pénétration des racines et le rendement des plantes cultivées, sauf dans les cas extrêmes (moins de 10 % ou plus de 50 % d'argile).

Toutefois, on s'accorde à reconnaître que l'arachide, l'ananas et le sisal préfèrent souvent des sols sableux. Parfois, on cite des chiffres précis : ainsi une texture superficielle optimale pour le caféier d'Arabie au Kivu serait : argile 15 %, limon 16,5 %, sables fins 35 %, sables grossiers 13,5 % (CULOT et WAMBEKE, 1958).

L'hévéa n'est pas une plante particulièrement sensible à la texture, mais on considère en Malaisie que les textures les plus favorables sont celles où les teneurs d'éléments fins (argile + limon) sont approximativement égales à celles des sables (sables fins + sables grossiers) ; toutefois, des sols possédant des proportions « argile + limon » comprises entre 30 % et 70 % sont parfaitement acceptables (CHAN HEUN YIN et *al.*, 1977).

En fait, si l'on va au fond des choses, on s'aperçoit que les propriétés des sols induites ou défavorisées par la texture ont beaucoup plus d'importance que la texture elle-même (OLIVEIRA, 1978) et qu'elles conditionnent souvent la valeur agricole du sol.

Tous les agriculteurs en effet savent qu'il importe de « prendre » la terre au « bon moment », de façon à ne pas provoquer l'apparition d'une structure en mottes dures et grossières, parfois lissées, à la suite des façons culturales. Ce bon moment correspond à un degré d'humidité variable, mais un peu inférieur à la capacité au champ. L'intervalle favorable est très large pour les sols sableux, beaucoup plus restreint pour les argiles. Pour ce qui concerne plus précisément les sols ferrallitiques, ceux-ci, même lorsqu'ils ont une importante proportion d'argile, ont un comportement qui les rapproche de celui de sols beaucoup plus sableux en raison de la présence d'une argile non-expansive, la kaolinite, et de pseudo-sables qui donnent à cette argile une tenue relativement proche de celle des sables, toutes proportions gardées. On peut affirmer que les sols ferrallitiques sont des sols faciles à travailler par rapport à beaucoup d'autres.

4. LES PROPRIETES DES SOLS INDUITES OU FAVORISEES PAR LA TEXTURE

4.1. LA COMPACITE

Les racines pénètrent fort bien dans les sols sableux alors qu'elles ont de plus grandes difficultés dans les sols argileux en raison de la forte compacité engendrée par l'argile (les sols sableux à sables fins sont également compacts). C'est ainsi que l'enracinement du *Coffea arabica* se fait mal au Kivu dans les sols ferrallitiques sur basalte décapés par l'érosion où l'horizon B argileux et compact apparaît en surface (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958). Une bonne structure peut corriger ce défaut : l'arachide réputée « aimant » les sols sableux prospère dans les sols fortement argileux (60 à 80 % d'argile) de la vallée du Niari au Congo-Brazzaville, grâce à l'excellente structure de ces sols : non seulement elle y développe bien ses racines, mais elle enfonce ses gynophores de façon absolument normale ; en outre, l'arrachage s'y fait dans des conditions satisfaisantes.

La présence de matière organique humifiée atténue considérablement la compacité des sols ferrallitiques : l'adage « l'humus allège les sols lourds » est également valable ici.

4.2. LA PERMEABILITE ET LE DRAINAGE

Les sols très sableux (moins de 13 % d'argile) sont extrêmement perméables à l'eau alors que les sols argileux peuvent présenter des phénomènes d'engorgement temporaires lors des fortes pluies. C'est pour cette raison que l'ananas, qui craint par dessus tout l'eau stagnante, est généralement planté dans des sols sableux, mais il prospère fort bien dans des sols nettement plus argileux s'ils possèdent un excellent drainage (GODEFROY, 1974). Le palmier à huile, pourtant moins sensible que l'ananas, craint les sols lourds, compacts et mal drainés, à tel point que la maladie du dessèchement des feuilles s'y produit par suite d'un excès d'eau provoquant la pourriture des racines (I.R.H.O., 1971). Une bonne structure du sol, même s'il est fortement argileux, assure un drainage convenable.

4.3. LES RESERVES EN EAU UTILE ET LE BILAN HYDRIQUE

Tout d'abord la présence d'éléments grossiers, graviers, cailloux, en diminuant le volume du sol et en augmentant le drainage, retentit défavorablement sur le bilan hydrique. Il y a toutefois des aspects positifs : apparaissant en surface, ces éléments grossiers diminuent le ruissellement et donc favorisent l'infiltration ; d'autre part, morceaux de roche pourrie et gravillons ferrugineux ont une porosité importante et donc emmagasinent une certaine quantité d'eau.

Quant au rôle de la texture proprement dite sur les réserves en eau utile, si OCHS et OLIVIN (1965) accordent une supériorité certaine aux sols sableux, la plupart des auteurs n'ont pas une position aussi tranchée. Il est d'ailleurs d'observation courante de voir les plantes résister mieux à la sécheresse dans des terres franches ou relativement argileuses que dans des sols très sableux.

Cette question sera examinée plus en détail au chapitre VI (p. 59 à 69).

En résumé, il semble que l'on puisse avancer les considérations suivantes :

— en climat très humide et à pluviosité bien répartie au cours de l'année, la texture n'a qu'une importance secondaire pour l'alimentation en eau des plantes, sauf, sans doute, dans le cas des sols très sableux ;

— lorsque les conditions climatiques sont moins favorables et surtout lorsqu'elles sont marginales, les propriétés texturales des sols deviennent primordiales pour le bilan hydrique. Tous les auteurs ont souligné le rôle néfaste des fortes quantités de sables grossiers, de graviers et de cailloux à ce point de vue. Toutefois, un sol relativement sableux ou sablo-argileux, ou gravillonnaire, en surface peut rompre les remontées capillaires et diminuer les pertes par évaporation. En outre la rétention d'eau par les gravillons poreux peut, dans une certaine mesure, compenser la diminution du volume du sol utile que leur présence entraîne.

4.4. LA MATIERE ORGANIQUE, LE COMPLEXE D'ECHANGE ET LES BASES ECHANGEABLES

Les corrélations positives entre teneur en éléments fins (argile et limon) et teneur en matière organique sont bien connues dans les sols : elles existent également dans les sols ferrallitiques (COMBEAU, OLLAT et QUANTIN, 1961). Or, matière organique et argile conditionnent très étroitement la valeur du complexe d'échange (C.E.C.) ; ces trois paramètres étant liés par une droite de régression (STEPHENS, 1969) :

$$CEC = 3{,}46\ (\text{carbone }\%) + 0{,}098\ (\text{argile }\%) + 0{,}730 \quad (\text{avec } r = 0{,}925)$$

Une relation similaire fut établie par OLLAT et COMBEAU (1960) pour des sols moyennement désaturés de Bambari en République Centrafricaine :

$$CEC = 2{,}43\ (\text{carbone }\%) + 0{,}071\ (\text{argile }\%) + 0{,}41$$
$$(t_1 = 6{,}680\ \text{THS et } t_2 = 2{,}797\ \text{HS})$$

Analysant, sur une parcelle de 10 hectares à Bouaké en Côte d'Ivoire, les liaisons qui peuvent exister entre teneur en argile d'une part, taux de matière organique, de phosphore total, de bases échangeables et la valeur de la capacité d'échange d'autre part, LE BUANEC (1972) trouve partout des corrélations hautement significatives.

5. CONCLUSION. ESSAI DE SYNTHÈSE : TEXTURE ET LIMITATIONS CULTURALES

A titre d'hypothèse de travail, il est présenté ici un tableau (tableau III.5.) donnant, en première approximation, les caractéristiques texturales comparées des horizons supérieurs A ou A_p et de l'horizon venant immédiatement au-dessous (horizon B le plus souvent).

Il doit demeurer entendu que les données contenues dans le tableau III.5. sont trop sommaires pour être valables dans tous les cas. Par exemple, une bonne structure superficielle est capable de tellement alléger les sols argileux qu'ils en arrivent à passer dans les catégories sans limitation culturale (Terra Roxa du Brésil, vallée du Niari au Congo). A l'inverse, des sols sableux composés pour la plus grande part de sables fins (20 à 100 microns) deviendront vite « battants », donc imperméables, donc sujets au ruissellement et à l'érosion.

TABLEAU III.5. — *Textures et limitations culturales*

Sols des régions humides (équatoriales et tropicales humides) Sols ferrallitiques principalement		
Texture de A	Texture de B	Contraintes culturales ou limitations
sablo-argileuse	argilo-sableuse	nulle à faible (1)
argilo-sableuse	argilo-sableuse	faible
sableuse	sablo-argileuse	moyenne
sableuse	argileuse ou argilo-sableuse	moyenne à forte (2)
argileuse	argileuse	forte (sauf bonne structure)
sableuse	sableuse	forte

On peut donner les définitions approximatives suivantes des appellations des textures, définitions seulement valables pour les sols ferrallitiques en raison de leurs faibles teneurs en limon (dans les cas les plus fréquents)

sableuse . . . . . moins de 13 % d'argile granulométrique
sablo-argileuse . . . . . de 13 à 25 % d'argile granulométrique
argilo-sableuse . . . . . de 25 à 40 % d'argile granulométrique
argileuse . . . . . plus de 40 % d'argile granulométrique

(1) Cette supériorité des sols à A sablo-argileux et B argilo-sableux est en particulier attestée par SMYTH et MONTGOMERY (1962) pour les sols à cacaoyer du Nigéria.

(2) Cette catégorie présente en général une limitation « moyenne », la limitation forte n'intervenant que pour les climats un peu excessifs ou trop secs ou très humides toute l'année.

Il faut en outre tenir compte des réactions propres à chaque plante : la canne à sucre et le riz admettront assez volontiers des sols fortement argileux, même ayant des structures médiocres (il sera tout de même recommandé d'effectuer un labour pour faciliter le développement des premières racines).

Autre cas particulier, les essences forestières, eucalyptus par exemple : leurs exigences édaphiques, le plus souvent minimes, se bornent en régions humides à une bonne pénétration des racines (sols sableux) à laquelle s'ajoute en zone sèche une bonne rétention pour l'eau (sol sableux en surface, progressivement plus argileux en profondeur).

la structure et la stabilité structurale

Malgré les travaux de devanciers (D'HOORE et FRIPIAT, 1948 au Zaïre ; HAVORD et *al.*, 1954 à la Trinidad ; PEREIRA, 1954 a et b au Kenya ; RIQUIER, 1955 à Madagascar), les études sur la structure n'ont vraiment commencé qu'à partir de 1960, avec l'application aux sols tropicaux — et en particulier aux sols ferrallitiques —, de méthodes qui ont l'avantage de chiffrer l'état structural des sols.

1. LES INDICES STRUCTURAUX ET LEURS METHODES D'ETUDE

1.1. METHODE « AMERICAINE » (BLACK et *al.*, 1955)

On évalue la structure par deux procédés :

— distribution des agrégats classés par dimensions après tamisage à sec,

— évaluation des classes d'agrégats par voie humide, soit par sédimentation, soit après tamisage sous l'eau.

Les résultats sont exprimés sous forme de diamètre pondéré moyen (mean weight diameter). On peut aussi évaluer, sous forme chiffrée, le nombre, la dimension et la stabilité des agrégats. Cette méthode, utilisée surtout pour les sols salés, semble n'avoir été que rarement appliquée aux sols ferrallitiques.

1.2. METHODE DE HENIN (HENIN et MONNIER, 1958 ; HENIN, COMBEAU et MONNIER, 1961)

La méthode de Hénin se caractérise essentiellement par l'utilisation d'un rapport chiffré entre, d'une part les teneurs en éléments fins, argile et limon, dispersés et d'autre part, les taux d'agrégats stables à l'eau sans prétraitement, avec prétraitement à l'alcool (1), avec prétraitement au benzène (1).

---

(1) Les prétraitements à l'alcool et au benzène sont destinés à apprécier les rôles respectifs de l'argile en tant qu'élément de cohésion des agrégats et de la matière organique en tant que facteur de protection contre la désagrégation par l'eau.

$$I_S = \frac{(A + L)\,\%}{\frac{\text{Agr. air} + \text{Agr. alcool} + \text{Agr. benzène}}{3} - 0{,}9\ \text{S.G.}}$$

où A et L, représentent les pourcentages maximum d'argile et limon dispersés ; S.G. ceux des sables grossiers déterminés par granulométrie et Agr. ceux des agrégats stables avec ou sans prétraitement après tamisage sous l'eau.

On obtient ainsi un indice d'instabilité structurale I_S qui réunit synthétiquement un certain nombre de chiffres dont chacun peut donner une information intéressant la structure.

En conséquence, les sols en bon état structural auront les indices les plus faibles et les moins stables, ou les plus dégradés, les indices les plus forts.

Les horizons superficiels (0-15 cm) des sols ferrallitiques sous végétation naturelle ont des indices normalement inférieurs à 1 :

$I_S = 0{,}18$ à $0{,}41$ dans les savanes de République Centrafricaine (BOYER et COMBEAU, 1960)

$I_S = 0{,}4$ à $0{,}5$ en forêt sèche de Casamance (FOURNIER, 1967)

$I_S = 0{,}53$ en forêt humide (sol sur sable tertiaire) de basse Côte d'Ivoire (GODEFROY, 1974)

$I_S = 0{,}10$ à $0{,}80$ sous végétation naturelle dans l'état de Bahia (Brésil) (VOLKOFF, 1975)

L'un de ces auteurs (GODEFROY) signale toutefois un I_S un peu supérieur à 1 dans le sol sur schiste de la forêt d'Azaguié en Côte d'Ivoire (sol ferrallitique fortement désaturé remanié).

Les horizons profonds (30 cm - 1 m) des sols ferrallitiques peuvent avoir des I_S élevés, de l'ordre de 3 à 6 (GODEFROY, 1974). Il semble toutefois, au moins dans l'état de Bahia au Brésil, que cet accroissement de I_S soit surtout le fait de l'horizon B_1, car, dès l'horizon B_2, I_S retrouve des valeurs plus faibles, pour la plupart comprises entre 0,5 et 2 (VOLKOFF, 1975).

1.3. METHODES DERIVEES DE LA METHODE HENIN

Bien que la méthode Hénin, dite d'instabilité structurale, soit de beaucoup la plus employée, certains auteurs ont proposé des tests simplifiés qui en dérivent : ainsi NGO CHANG BANG (1968) a établi un indice basé sur la taille des agrégats qui donne satisfaction à Madagascar, tandis que GODEFROY (1974) compare en Côte d'Ivoire les taux d'agrégats stables à l'eau avec et sans prétraitement à l'alcool et au benzène, en liaison d'ailleurs avec l'indice I_S. Comme la méthode Hénin s'applique mal aux sols sableux, POULAIN (1960) a proposé une simplification adaptée à ces sols.

Toutes ces modifications ne paraissent pas avoir dépassé le plan local.

1.4. ETAT STRUCTURAL DU SOL - INDICE (HENIN, MONNIER, COMBEAU, 1958)

Comme l'indice d'instabilité I_S ne mesure que la résistance des agrégats aux agents perturbateurs, la pluie surtout, on a essayé de l'améliorer en intégrant la perméabilité mesurée par la méthode de Darcy sur échantillons tamisés à 2 mm. On obtient ainsi un indice d'état structural du sol défini par la projection du point représentatif d'un échantillon sur la droite d'équation

$$3 \log_{10} K + 2{,}5 \log_{10} I_S - 7{,}5 = 0,$$

le segment de droite compris entre les axes de coordonnées log 10 I_s et log 10 K étant gradué de 0 à 100. Cet indice fut surtout utilisé à Madagascar, en même temps d'ailleurs que I_s (BOUCHARD, 1967 ; DAMOUR et KILIAN, 1967). Son emploi ne s'est pas généralisé, sans doute parce qu'il ne reflétait pas mieux que I_s l'état structural du sol ; en outre l'écrasement de l'échelonnement des valeurs dû à l'emploi des logarithmes en rend l'interprétation malaisée.

1.5. METHODE DABIN (DABIN, 1960 et 1962)

Cet auteur a établi un indice de structure (et non d'instabilité structurale) défini par l'équation suivante :

$$\text{Indice Structure} = St \,.\, \sqrt[2]{P_u.E_u}$$

avec $S_t = 20\ (2{,}5 \log_{10} K - 0{,}837 \log_{10} I_s)$

où I_s est l'indice d'instabilité de HENIN

K est la perméabilité en cm/h

P_u est la porosité utile (porosité totale – porosité à pF 4,2)

E_u est l'eau utile (pF 3 – pF 4,2).

Cet indice sert de base à une échelle de fertilité valable surtout pour les sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire (tableau IV.1.).

Malgré sa complexité apparente, l'indice de structure de DABIN fut utilisé largement dans les sols soumis à la culture cotonnière en Côte d'Ivoire (LATHAM, 1971) où les corrélations avec les rendements se révélèrent bonnes pourvu que soient corrigées certaines déficiences chimiques.

TABLEAU IV.1. – *Echelle de la fertilité basée sur l'indice de structure d'après DABIN (1962)*

Horizon	Indice de structure	Appréciation de la fertilité
Horizon supérieur (0-25 cm)	2.000	exceptionnelle
	1.600-2.000	très bonne
	1.400-1.300	bonne
	1.100-1.400	moyenne
	900-1.100	médiocre
	900	mauvaise
Horizon de profondeur (25-50 cm)	900	bonne
	700-900	moyenne
	500-700	médiocre
	500	mauvaise

Il apparaît que dans ce cas particulier, on peut simplifier la formule de DABIN en utilisant seulement le terme S_t (LATHAM, *op.cit.*) :

– sols fertiles $S_t \geq 750$

– sols moyennement fertiles $750 < S_t < 500$

– sols peu fertiles $S_t < 500$

BOUCHARD et DAMOUR (1971) ont tenté d'utiliser cet indice pour le palmier à huile sur la côte est de Madagascar.

1.6. AUTRES METHODES

On a parfois appliqué aux sols ferrallitiques, mais de façon épisodique semble-t-il, les tests d'ATTERBERG : limite de liquidité, limite de plasticité, indice de plasticité (COMBEAU, 1964). Les résultats obtenus ne paraissent pas avoir permis d'obtenir des données plus intéressantes que l'indice I_S de HENIN.

2. LES FACTEURS DE LA STRUCTURE

Alors que la structure des sols tempérés est conditionnée par le calcium et la matière organique, celle des sols ferrallitiques l'est surtout par le fer et la matière organique.

2.1. ROLE NUL OU FAIBLE DU CALCIUM

Le calcium aurait peu ou pas d'influence sur la structure des sols ferrallitiques ; ce fait est attesté par ROCHE et VELLY (1962) à Madagascar, MARTIN G. (1963) au Congo-Brazzaville, PRATT (1965) pour les Terra Roxa du Brésil, NYE (1963) au Ghana, GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL (1976) en basse Côte d'Ivoire. Il est vrai qu'il s'agit dans ces exemples de calcium apporté par chaulage.

On constate néanmoins que les sols à complexe absorbant bien fourni en bases, donc en calcium, ont assez souvent une meilleure structure que les sols fortement désaturés (ROOSE, 1973-b).

Faut-il en conclure à un rôle direct faible du calcium ou à un rôle indirect par son influence sur la quantité et la qualité de la matière organique ? D'autre part, des travaux récents (CHAUVEL, PEDRO, TESSIER, 1976) montrent que le calcium associé au fer provoque une sorte de foisonnement des cristaux de Kaolinite qui retentit sur la structure du sol.

2.2. ROLE DU FER

Il ne peut être question de passer en revue l'abondante littérature qui traite des relations fer-structure depuis que LUTZ (1936) a pressenti le rôle du fer dans l'agrégation ; on se contentera d'en dégager quelques conclusions valables pour les sols ferrallitiques.

Le fer a vraisemblablement trois actions principales :

— étant électro-positif, il neutralise la kaolinite colloïde électro-négatif et permet ainsi la formation d'agrégats par neutralisation des charges libres (NYE, 1963) ;

— il oriente les cristaux de kaolinite et les soude entre eux (BAVER, 1972) ;

— il forme avec la matière organique des complexes humo-ferriques très favorables au maintien d'une structure stable et de bonne qualité (MARTIN G., 1963). Il pourrait s'agir d'une sorte de « séquestration » par les sexquioxydes de fer d'une partie de la matière organique fraîche ou peu évoluée (PERRAUD, NGUYEN KHA et JACQUIN, 1971).

On a l'habitude de considérer que c'est essentiellement le fer libre (1) (2) qui est la forme active du fer (BATES, 1960 ; NYE, 1963 ; MARTIN, 1963) : on trouve d'ailleurs des corrélations significatives entre fer libre et structure (MARTIN G., *op. cit.*). Or, le fer libre, s'il est abondant dans les horizons B des sols ferrallitiques, existe en quantité nettement plus faible dans les horizons humifères ; on peut donc en déduire, a priori, que si le fer libre est un facteur essentiel dans la structure des horizons profonds, il partage ce rôle avec la matière organique dans les horizons superficiels.

2.3. ROLE DE LA MATIERE ORGANIQUE

L'importance de la matière organique, dans le développement des structures et l'affermissement de la stabilité structurale, est attestée par de très nombreux auteurs (BATES, 1960 au Nigéria ; COMBEAU et MONNIER, 1961 ; COMBEAU et QUANTIN, 1964 en République Centrafricaine ; ROCHE et VELLY, 1962 à Madagascar ; GODEFROY et *al.*, 1969 ; GODEFROY, 1974 en basse Côte d'Ivoire). On consultera également le tome IV de cette collection, Chapitre I (de BOISSEZON, 1973).

Les opinions divergent lorsqu'il s'agit de savoir quelle est la fraction la plus active de la matière organique ; pour COMBEAU et QUANTIN (1964), ce rôle serait dévolu principalement à la fraction non encore humifiée de la matière organique, tandis que GREENLAND (1962) et HARRIS et *al.* (1964) insistent sur le rôle des champignons et des micro-organismes dans l'agrégation. Plusieurs auteurs (GREENLAND, 1965 ; GUCKERT, 1973) font intervenir les polysaccharides : ces chaînes moléculaires de poids élevé et d'aspect flexible s'étalent à la surface des argiles en établissant avec ces dernières de nombreux points de contact ; chacune de ces liaisons est de faible intensité, mais leur nombre confère à l'ensemble une cohésion élevée (3). Enfin, une troisième catégorie d'auteurs (les plus nombreux) pensent que l'humine, et surtout la fraction jeune de l'humine, tient une place essentielle dans la stabilité structurale ; l'humine est malheureusement le constituant le plus mal connu de toutes les fractions de l'humus. Par contre, les fractions les moins polymérisées de la matière organique évoluée auront un rôle nettement défavorable sur la structure : FAUCK (1973) attribue aux acides fulviques, migrant seuls en B, la désorganisation structurale (I_S élevés) qui caractérise souvent cet horizon. TURENNE (1975) considère que, dans l'horizon supérieur de sols de Guyane, ce sont les acides fulviques peu polymérisés qui favorisent l'instabilité structurale, tandis que les acides humiques polymérisés et peu mobiles ont l'effet inverse.

Il semble bien que chacun de ces constituants puisse agir simultanément. GODEFROY (1974), étudiant dans un sol ferrallitique fortement désaturé de basse Côte d'Ivoire l'action des résidus de récolte sur la structure, trouve que les déchets de bananiers sont moins efficients que ceux d'ananas ; or ces derniers se décomposent plus lentement et produisent plus d'humine et de polysaccharides que les premiers... Toutefois, la matière organique n'agit pas seule dans le sol : une partie au moins, la plus fraîche et la plus

---

(1) On admet ici que le fer libre est celui qui est extrait par la méthode de Deb (DEB, 1950) ou l'une de ses nombreuses variantes (SEGALEN, 1971).

(2) Des expériences de laboratoire effectuées sur un sol de Casamance (sud du Sénégal) ont montré que l'extraction d'une quantité minime de fer par un traitement de Tamm, ou son adjonction, peut modifier considérablement le comportement structural de la kaolinite ; d'où les répercussions sur la structure du sol (CHAUVEL, PEDRO, TESSIER, 1976).

(3) Le lecteur désireux d'approfondir ses connaissances sur l'action des polysaccharides sur la structure pourra consulter : ALLISON (1958) ; ESCOLAR (1967) ; HARRIS, CHESTER, ALLEN (1966) ; MARTIN J.P. (1971) ; VAN ROYEN et WEBER (1977).

évoluée, est « séquestrée » par le fer (PERRAUD et *al.*, 1971) ; le complexe ainsi formé joue un rôle bénéfique important dans les caractéristiques structurales (MARTIN G., 1963).

2.4. ROLE DE L'ARGILE

La teneur en argile n'intervient pas à proprement parler dans la stabilité structurale ; l'argile s'associe toutefois au fer auquel elle sert de support et avec lequel on la confond souvent (les sexquioxydes de fer dispersés sont comptés comme « argile » dans l'analyse granulométrique). On sait aussi qu'argile et humus se combinent entre-eux sous forme de colloïdes complexes. C'est sans doute pour ces raisons que l'on trouve une corrélation seulement significative entre matière organique, fer libre et structure, mais hautement significative entre matière organique, argile, fer libre et structure dans les sols ferrallitiques fortement désaturés de la vallée du Niari (Congo-Brazzaville) tandis qu'il n'y a aucune corrélation entre teneur en argile et structure (MARTIN G., 1963).

On sait aussi que plus un sol est argileux, plus il a de chances de retenir une forte quantité d'humus ; aussi DABIN (1963) a-t-il établi une échelle d'appréciation empirique pour la stabilité structurale en fonction des teneurs du sol en argile et en matière organique (étant entendu que les sols considérés ont à peu près les mêmes teneurs en fer libre).

Il est probable également que les minéraux de la famille de la kaolinite (kaolinite sensu stricto, kaolinite désordonnée ou fire-clay, halloysite, métahalloysite...) influencent de façon un peu différente le comportement structural du sol ; ainsi RICHE et *al.* (1974) et REGO (1977) pensent que la métahalloysite engendre des agrégats plus gros et plus solides que la kaolinite sensu-stricto et les fire-clays, ceci respectivement en Ethiopie et au Brésil.

2.5. RECAPITULATION

Parmi ces facteurs de la structure on peut distinguer deux facteurs prépondérants : la matière organique et le fer, un facteur subordonné, la teneur en argile, et peut-être un deuxième facteur subordonné, le calcium ou les bases.

Malgré tout, on s'explique encore mal les relations qui peuvent exister entre eux : pourquoi, par exemple, le brûlis d'un abattis de forêt en Guyane a-t-il amélioré la structure de l'horizon de surface malgré la disparition de la matière organique superficielle (TURENNE, 1969) ? Libération de bases ? Pectisation de l'argile et des colloïdes humo-argileux ? Changement d'état chimique du fer ? L'hypothèse la plus vraisemblable fait intervenir une polymérisation, d'ailleurs instable, de composés organiques fugaces qui persistent moins de deux ans dans le sol (TURENNE, com. pers.).

2.6. ACTION DES RACINES DES PLANTES

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un facteur propre au sol, il faut faire une place ici à l'action des racines des plantes. La végétation n'a pas seulement un rôle passif en protégeant le sol contre l'impact des gouttes de pluie et en lui apportant des matériaux organiques, ses racines interviennent également par une certaine « trituration » qui favorise la formation des agrégats.

Les travaux de BUI HUU TRI (1968), effectués en zone tempérée (région parisienne), ont mis en relief la capacité des racines des graminées de prairie de diviser le sol en fins agrégats en profitant essentiellement de la tendance naturelle du sol à se fendiller et à se craqueler. A priori, on peut penser que cette action sera bien moindre dans les sols ferrallitiques où la fraction argileuse est principalement composée de kaolinite, argile non expansive. En fait, ces sols se craquèlent malgré tout quelque peu et tous les observateurs ont remarqué l'influence favorable des racines sur l'agrégation.

On constate, à Madagascar, que ce sont surtout les systèmes racinaires fasciculés qui provoquent la plus forte amélioration de I_S et non les racines pivotantes ou à rhizomes ; les graminées ont là un net avantage (DAMOUR et KILIAN, 1967). On a pu, en République Centrafricaine, chiffrer à environ quatre ans la durée d'une jachère à *Pennisetum purpureum* ou *Panicum maximum* suffisante pour ramener l'indice d'instabilité I_S à une valeur proche de celle qui existe sous savane naturelle ; au contraire *Stylosanthes gracilis* et *Pueraria javanica* n'apportent aucune amélioration, même au bout de six années (MOREL et QUANTIN, 1964 et 1972). Il faut sans doute attribuer à l'action des racines de maïs les améliorations de l'indice de deux sols des hauts plateaux malgaches après apports de dolomie, phosphate, chlorure de potasse (à petite dose) et azote (à forte dose) (BOUCHARD, 1967) ; ces sols étant fortement carencés en presque tous ces éléments, les racines de cette graminée ne peuvent se développer normalement qu'en présence d'engrais. On a également noté en basse Côte d'Ivoire (sol sur sables tertiaires) une certaine action bénéfique des graminées sur la structure par rapport à celle d'autres types de plantes.

Il est d'ailleurs très difficile de séparer l'effet propre des racines de celui que provoque la matière organique qu'elles apportent.

3. LES DEUX PHASES DE L'AGREGATION

Qu'il s'agisse des régions tempérées ou tropicales, tous les auteurs ont remarqué que l'enfouissement de matières organiques vertes avait peu d'influence à long terme sur les caractéristiques structurales mais que l'effet bénéfique global était important pendant une saison de culture : d'où les controverses sur l'utilité des engrais verts (BOYER, 1970 ; MOREL et QUANTIN, 1972). Il est évident qu'indépendamment de cette agrégation fugitive, il existe un « fond » d'agrégats dont la stabilité ne doit rien à la matière verte enfouie.

Aussi peut-on adopter pour les sols ferrallitiques la théorie des deux phases d'agrégation (MONNIER, 1965 ; GUCKERT, 1973 ; GODEFROY, 1974) :

— une phase d'agrégation fugace (durée maximum un an) provoquée par l'action des bactéries et champignons sur les déchets organiques facilement décomposables et par la formation concomitante de polysaccharides,

— une phase d'agrégation stable due principalement à la fraction jeune de l'humine et aux composés humoferriques.

Cette théorie ne peut rendre compte de tous les problèmes soulevés : elle a toutefois le mérite de poser la question de la qualité des déchets organiques appliqués au sol : on sait que le fumier, les pailles et les végétaux partiellement lignifiés provoquent un accroissement du nombre des agrégats stables ; même parmi les matières vertes, certaines induisent une meilleure stabilité structurale que d'autres (cas des résidus de récolte de bananier et d'ananas selon GODEFROY (1974), très faible action du maïs engrais vert selon MOREL et QUANTIN, 1972).

4. LES VARIATIONS DE L'ETAT STRUCTURAL DU SOL

4.1. LES VARIATIONS SAISONNIERES

Tous les pédologues travaillant en zone tropicale ont remarqué qu'à la fin de la saison des pluies, les agrégats sont moins bien formés et moins stables qu'au cœur de la saison sèche : l'eau qui percole à travers le sol a tendance à affaiblir l'agrégation (ce que l'on constate en toute saison avec irrigation), tandis que la dessiccation améliore grandement les caractéristiques structurales.

COMBEAU et QUANTIN (1963) ont étudié pas à pas le phénomène et l'ont chiffré à l'aide de l'indice I_S de HENIN. De leurs travaux effectués à Grimari (R.C.A.), on peut tirer les conclusions suivantes :

— Il existe indiscutablement une périodicité annuelle de l'instabilité structurale (indice I_S de HENIN) d'autant plus forte en valeur absolue que I_S moyen (moyenne des valeurs au long de l'année) est plus élevé (tableau IV.2.).

TABLEAU IV.2. — *Variation saisonnière de I_S dans l'horizon superficiel de sols ferrallitiques de la République Centrafricaine selon COMBEAU et QUANTIN, 1963*

	I_S moyen	Amplitude des variations saisonnières par rapport à I_S moyen en valeur absolue	valeur relative
Sous savane	0,40	0,25	62 %
Sous culture	1,71	0,90	52 %

Cette amplitude saisonnière peut faire varier l'indice d'instabilité structurale du simple (saison sèche) au double (saison des pluies).

— Les valeurs les plus fortes de I_S sont atteintes de juillet à fin octobre, c'est-à-dire pendant les mois les plus pluvieux, tandis que les valeurs les plus faibles sont enregistrées en février vers la fin de la saison sèche, par suite de la forte dessication du sol.

— L'amélioration de la structure se fait brutalement au début de la saison sèche (novembre) et se poursuit ensuite lentement jusqu'aux premières pluies importantes (début mars).

Ces modifications de la valeur de I_S existent même dans les climats réputés très humides, comme celui de la Guyane (TURENNE, 1975), pourvu qu'il existe une période sèche, même de courte durée.

BOUCHARD (1967) a également trouvé des variations saisonnières de la structure sur les sols des hauts plateaux malgaches ; comme il utilise l'indice Σ d'état structural, l'amplitude des variations est sensiblement amortie par rapport à celles de I_S ; les valeurs minimales ne sont que de 5 à 15 % inférieures aux valeurs maximales au lieu de passer du simple au double comme c'est le cas dans le tableau IV.2.

Les variations au cours de l'année ne sont pas le privilège des sols ferrallitiques ou même tropicaux ; elles existent également en zone tempérée où leur amplitude est du même ordre de grandeur (COMBEAU, 1965).

4.2. LES VARIATIONS INDUITES PAR LES CULTURES

La mise en culture d'un sol provoque toujours une certaine dégradation de la structure ou, en d'autres termes, un accroissement de l'indice I_S d'instabilité structurale.

Cela se produit en Côte d'Ivoire même sous bananiers, culture qui couvre cependant fort bien le sol ; I_S passe de 1,06 sous forêt à 2,49 une vingtaine d'années après défrichement (GODEFROY, 1974) ; bien que ce phénomène n'affecte pas les rendements en bananes, on peut constater que la péjoration des caractéristiques structurales est lente mais continue.

Elle est plus rapide dans le cas des plantes sarclées grâce à la dénudation du sol pendant un temps plus ou moins long (combustion accélérée de la matière organique, destruction des agrégats par l'impact des gouttes de pluie) et aux façons culturales. MOREL et QUANTIN (1972) ont évalué la dégradation de la structure des sols ferrallitiques moyennement désaturée de Grimari (R.C.A.) cultivés plusieurs années de suite en plantes sarclées (tableau IV.3.).

TABLEAU IV.3. — *Evolution de l'indice I_S en fonction du temps de culture d'après MOREL et QUANTIN, 1972*

Traitement du sol	I_S
Savane à imperata (témoin)	0,3 à 0,4
Après un an de culture...	0,6
Après deux ans de culture	0,8
Après trois à quatre ans de culture...	1,0
Après huit ans de culture	1,7 à 1,8
Après neuf ans de culture	1,9 à 2,1

Dès que I_S dépasse 1,0, certains inconvénients apparaissent selon MOREL et QUANTIN (1972) : le sol se croûte et se glace, d'où une perméabilité superficielle diminuée et une porosité affaiblie.

Cette péjoration des propriétés structurales du sol n'a pas provoqué de chute de rendement dans le cas particulier de Grimari grâce aux labours qui ont permis de « rénover » la porosité, surtout la macro-porosité, ceci au moins pendant la période critique de la germination et de l'enracinement des jeunes plantes. On peut néanmoins se demander combien de temps encore durera cet effet améliorant des labours annuels si la structure continue à se dégrader.

5. CONSEQUENCES DE LA DEGRADATION DE LA STRUCTURE DANS LES SOLS CULTIVES

Si les variations de la structure dues à la culture n'ont pas eu d'incidence sur les rendements au moins dans les deux exemples proposés plus haut, elles ont, bien sûr, des conséquences sur certaines propriétés du sol, conséquences dont le cumul devrait provoquer au bout d'un certain temps un abaissement du niveau général de fertilité.

5.1. UNE DIMINUTION DE LA PERMEABILITE

On a mesuré en laboratoire la perméabilité des sols ferrallitiques de Grimari (R.C.A.) sur quelques types de rotation culturales (BOYER et COMBEAU, 1960), ainsi que dans une culture d'arachide au Sénégal (FOURNIER, 1967).

TABLEAU IV.4. — *Perméabilité et longueur de la rotation culturale*

D'après BOYER et COMBEAU (1960) — République Centrafricaine		
Type et longueur de la rotation culturale		Perméabilité en cm/h
Savane témoin...		15,0 cm/h
Six ans de jachère à *Imperata* plus un an de culture...		13,9 cm/h
Quatre ans de culture plus un an de jachère à *Pueraria*...		9,87 cm/h
D'après FOURNIER (1967) — Casamance		
Forêt sèche	témoin	3 à 5 cm/h
Arachides	2ème année	2,5 cm/h
Arachides	6ème année	1,8 à 2,6 cm/h

Si l'on s'en tient aux chiffres bruts (tableau IV.4.) cette baisse de perméabilité n'apparaît pas alarmante. Toutefois, on constate sur le terrain que la baisse de perméabilité entre la savane témoin et le sol après un an de culture correspond dès la deuxième année à l'apparition d'une érosion notable et d'un vigoureux ruissellement de surface lors de fortes pluies.

5.2. UN ACCROISSEMENT DE L'EROSION SUPERFICIELLE

Au fur et à mesure que les caractéristiques structurales se détériorent, il y a augmentation de l'érosion, à la fois en quantité par accroissement des pertes en terre et en qualité par enlèvement de plus en plus sélectif des éléments fins (argile, limon, matière organique), support essentiel de la fertilité (QUANTIN et COMBEAU, 1963 ; MOREL et QUANTIN, 1972 ; LE BUANEC, 1972 ; ROOSE, 1967-c et 1973 entre autres).

Le processus est bien connu : destruction des agrégats par impact des gouttes d'eau, formation d'une pellicule dure superficielle, mise en suspension par la pluie des parties fines qui se déposent par décantation, les plus grossières (sable fin) à proximité immédiate dans les micro-reliefs, les plus légères (matières organiques, argile, limon) souvent hors du champ cultivé.

5.3. UNE DIFFICULTE POUR LA GERMINATION ET L'ENRACINEMENT DES PLANTES

On a remarqué que plus un sol était dégradé au point de vue de sa structure, plus la végétation naturelle avait de la peine à se réinstaller. Ce phénomène commence à se faire nettement sentir dès que l'instabilité structurale (I_s) atteint 1,8 à 1,9 et s'accroît évidem-

ment pour des valeurs de I_S plus élevées. Il semble qu'il faille surtout voir là une conséquence de l'affaiblissement de la porosité, car les plantes cultivées semblent peu en souffrir pourvu qu'il y ait eu labour, donc « rénovation » préalable, bien que provisoire, de la porosité (MOREL et QUANTIN, 1964 et 1972). Le problème reste cependant grave : l'agriculture des tropiques ne possède généralement pas les moyens mécaniques pour procéder aux labours rendus nécessaires par une structure dégradée ; en outre, la jachère naturelle est le procédé le plus largement répandu pour régénérer les propriétés des sols en général et la structure en particulier. Si, par suite d'une trop forte dégradation du sol, elle se réinstalle mal, le paysan ne voit aucun intérêt à l'implanter artificiellement par une façon culturale supplémentaire. Il est donc préférable, en pratique, de préconiser des durées relativement courtes, 2 à 4 ans, des cultures traditionnelles permettant la reprise spontanée de la jachère. On conseille même un à deux ans s'il s'agit de jachères forestières (LAUDELOUT et VAN BLADEL, 1967).

6. AMELIORATION DE LA STRUCTURE

Mis en face des conséquences de la détérioration des caractéristiques structurales, l'agronome essaie de réagir par un certain nombre de procédés culturaux.

Le labour :

Il provoque une certaine formation d'agrégats par effet de cohésion, mais il a surtout pour effet une augmentation considérable de la porosité. Cette amélioration ne persiste guère au-delà de la durée d'un cycle cultural et elle peut lui être considérablement inférieure (BOISSEZON, BONZON, TALINEAU, 1969). D'une façon générale, on considère que les labours « abiment » les bonnes structures, beaucoup moins d'ailleurs en sols argileux qu'en sols sableux (PRATT, 1965). Ce n'est que dans le cas où elles sont « mauvaises » que le labour peut les régénérer fortement, mais de façon fugace, en ameublissant le sol et en augmentant sa macroporosité.

En fait, en dehors de cette amélioration momentanée, le labour provoque un effet antagoniste par son retentissement sur la structure : il s'agit de la minéralisation de la matière organique qu'il accélère. Ce deuxième effet peut devenir prépondérant à terme (plusieurs années).

L'engrais vert :

Une prairie de *Stylosanthes gracilis* ou un maïs de deux mois enfoui par labour ne paraît pas avoir d'effet favorable, même à court terme, sur la structure en sols ferrallitiques de la République Centrafricaine (MOREL et QUANTIN, 1972), au contraire de ce qui se passe en d'autres régions et avec d'autres plantes. Cette divergence d'opinion pose la question de la « qualité » de l'engrais vert.

L'enfouissement de fumier, de paille et de résidus de récolte :

Ces amendements agissent indirectement en augmentant la teneur en humus du sol. Quelques remarques toutefois : les quantités doivent être importantes, 30 à 50 tonnes au moins par hectare, pour « marquer » sur la structure. Les végétaux partiellement lignifiés

ont seuls une action importante (pailles par exemple) ; enfin l'association fumier de ferme-paille semble souvent bénéfique. En culture continue intensive, l'enfouissement des résidus de récolte, surtout s'il s'agit de paille de céréales, semble à peu près suffisant pour maintenir I_S vers 0,8-1,0, ce qui suffit pour éviter la plupart des inconvénients provoqués par la dégradation de la structure.

La jachère :

C'est le procédé traditionnel normalement employé sous les tropiques pour régénérer la structure. On peut considérer qu'il faut un temps de jachère au moins égal, mais habituellement supérieur au temps de culture pour retrouver une valeur I_S comparable à celle du sol sous végétation spontanée ; en pratique on se contente de I_S voisin de 0,60 à 0,80 pour des sols dont l'indice d'instabilité est de 0,30-0,40 sous végétation naturelle.

Il existe toutefois un impératif : la jachère doit pousser vite et être bien fournie ; or on a vu que cette condition n'était remplie pour la jachère naturelle que si la structure n'était pas trop dégradée (I_S inférieur à 1,8), sinon il faut installer une prairie par semis après labour pour éviter que le sol ne continue à se dégrader pendant la période où il sera mal couvert.

Une question est souvent posée : peut-on faire pâturer les jachères et prairies sans danger pour la structure ? En Afrique francophone les opinions sont jusqu'à présent très réservées, sinon franchement défavorables (1) ; par contre, en Afrique Orientale (Ouganda), le pâturage intensif ne paraît avoir eu que des conséquences favorables, puisque les rendements des plantes sarclées, sur défriches de pâtures, sont nettement supérieurs à ceux obtenus sur défriches de savane (DAGG, 1958 ; STOBBS, 1969). Ceci ne veut évidemment pas dire que le piétinement des animaux ne tasse pas le sol, au moins sur les quelques centimètres superficiels, mais que les conséquences de ce tassement sont négligeables lors de la remise en culture.

7. CONCLUSION

La structure des sols ferrallitiques apparaît conditionnée par deux facteurs principaux, le fer et la matière organique. On peut la mesurer actuellement par un certain nombre d'indices, dont l'indice I_S d'instabilité structurale de Hénin. Les indications chiffrées qui en découlent permettent de constater que les indices structuraux varient suivant les saisons. Mais surtout, ces méthodes ont donné des points de repère pour évaluer la dégradation de la structure à la suite des cultures successives.

Si le labour donne un coup de fouet, efficace mais fugitif, aux caractéristiques structurales, les procédés les plus efficients pour régénérer la structure sont les enfouissements de fumier et de paille et surtout une durée suffisante de jachère, qu'elle soit naturelle ou artificielle. Dans ce dernier cas il s'agit très généralement de prairies, alors qu'une jachère naturelle peut-être herbacée ou forestière.

(1) Actuellement les agronomes ORSTOM de Côte d'Ivoire pensent qu'un pâturage bien conduit peut être bénéfique pour la structure du sol.

la porosité

(compacité, densité apparente, densité réelle)

1. GENERALITES

1.1. LIAISONS ENTRE POROSITE, COMPACITE, DENSITE APPARENTE ET DENSITE REELLE

Ces quatre paramètres se relient entre-eux par des relations simples :

$$C = 100\frac{d}{D}$$

$$P = 100\left(1-\frac{d}{D}\right) \text{ ou } P = 100 - C \text{ ou } P = 100\frac{D-d}{D}$$

La compacité C s'exprime ainsi en pourcentage de la densité apparente d par rapport à la densité réelle D ; la porosité P en pourcentage volumique du sol est le complément à 100 de la compacité.

Certains auteurs préfèrent employer des valeurs absolues ; les formules deviennent alors :

$$C = \frac{d}{D} \text{ et } P = 1-\frac{d}{D} \text{ ou } P = \frac{D-d}{D}$$

tandis que porosité et compacité se mesurent sur une échelle comprise entre 0 et 1.

Le quartz ayant un rôle neutre, on peut chercher à en faire abstraction et calculer porosité et compacité hors quartz, P' et C' (HUMBEL, 1974).

$$C' = \frac{d}{D}\,\frac{2{,}65-sD}{2{,}65-sD}$$

$$P' = 1 - C'$$

où s est la teneur en quartz et 2,65 sa densité.

Ces deux dernières expressions permettent de comparer entre eux des profils qui n'ont pas les mêmes teneurs en éléments grossiers (20 - 2 000 microns) : tableau V.1. (voir page suivante).

La densité réelle des sols ferrallitiques est relativement constante : sa valeur moyenne se situe vers 2,7 avec un intervalle de variation de faible ampleur, 2,60 pour les sols à sable quartzeux à 2,90 pour les sols les plus argileux suivant la teneur en minéraux lourds. La densité apparente varie plus largement : l'humus, les galeries des racines et des animaux (termites en particulier) peuvent alléger le sol de façon notable, d'où des densités apparentes parfois inférieures à 1 ; les horizons les plus compacts ont rarement des densités apparentes supérieures à 1,5, sauf présence d'éléments ferrugineux concrétionnés. Toutefois

les horizons B2 de certains sols de Guyane, sols sur socle précambrien surtout, ont des densités apparentes élevées de l'ordre de 1,7 à 1,8.

Sur un même type de sol, le genre de végétation peut introduire des variations importantes : ainsi un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire a une densité moyenne de 1,23 pour l'horizon A1 avec une plage de variation de 0,60 à 1,37 ; or, lorsqu'il y a couverture forestière, la densité de A1 est généralement inférieure à 1,23 ; elle lui est supérieure le plus souvent s'il y a savane (de BLIC, 1976). On a obtenu des résultats similaires en Malaisie avec des couvertures artificielles (R.R.I.M., 1974).

Pour la commodité de l'exposé, on a choisi d'employer le plus souvent possible une seule variable : la porosité exprimée en pourcentage volumique du sol ; le complément à 100 mesure évidemment la compacité. Connaissant la densité réelle des sols ferrallitiques, il est facile de retrouver la densité apparente grâce à la porosité (ou à la compacité) et inversement.

TABLEAU V.1. — *Relations entre densité réelle D, densité apparente d, compacité C, compacité hors quartz C', porosité P et teneur en éléments grossiers dans trois profils de l'Adamaoua (Cameroun) d'après* HUMBEL, *1974*

Sol	Profondeur cm	Eléments % grossiers	d	D	C %	C' %	P %
Sol sur	5-10	9	1,23	2,87	42,9	40,4	57,1
basalte	100	8	0,92	2,86	32,2	30,2	67,8
Sol sur	5-10	40	1,39	2,60	53,5	41,5	46,5
granite	100	27	0,99	2,69	37,0	30,0	63,0
Sol sur	10-15	38	1,42	2,71	52,2	40,5	47,8
roche mixte (1)	100	30	1,09	2,72	40,1	31,8	59,9

(1) Mélange des deux roches dû à une explosion volcanique.

1.2. POROSITE TOTALE, MACROPOROSITE, MICROPOROSITE

La porosité P est une porosité totale qui englobe tous les pores du sol, donc tout l'espace qui n'est pas occupé par la matière solide. On la divise habituellement en deux composantes :

— la macroporosité ou espace occupé par l'air après ressuyage du sol au bout de 24 H à 72 H selon les sols : c'est donc la porosité minimale pour l'air ; on la calcule en faisant la différence entre porosité totale et microporosité.

— la microporosité : c'est en définitive l'espace rempli par l'eau utile mesurée entre le point de flétrissement (pF 4,2) et la capacité au champ, augmenté d'une « minimicroporosité » correspondant au volume de l'eau restant dans le sol à des pF supérieurs à 4,2, donc dans des pores de diamètre moyen inférieur à 0,2 microns.

La limite entre microporosité et macroporosité, si elle peut se définir sur le terrain, ne correspond malheureusement pas à une norme physique fixe exprimée en tension d'humidité ; elle peut varier de pF 3,0 pour les sols argileux à pF 2,0 (ou parfois moins) pour les sols sableux, donc à des diamètres moyens théoriques de pores respectivement de 3 à 30 microns.

Afin de fixer les idées, on peut dire, en première approximation, que la microporosité des sols ferrallitiques est comprise entre le quart et la moitié de la porosité volumique totale, soit le plus souvent 15 à 30 points d'humidité, la macroporosité faisant le complément (MEDINA et GROHMANN, cités par VAN WAMBEKE, 1974 ; MOREL et QUANTIN, 1972). Des microporosités de 10 points existent (GODEFROY, 1974), mais paraissent rares.

La porosité des sols n'est pas seulement déterminée par des moyens physiques reposant sur la mesure des densités ou la détermination du potentiel matriciel (courbes de pF), elle l'est aussi, et de plus en plus, par des études sur lames minces de sol ; peut-être parce que les pores sont pour la plupart coupés obliquement, les micromorphologues prennent souvent comme limite entre micro et macroporosité un diamètre de pores élevé, 50 microns assez souvent. Les résultats obtenus par les deux méthodes ne sont pas totalement comparables entre-eux.

1.3. POROSITE STRUCTURALE ET POROSITE MOTTIERE (Bui Huu Tri et Monnier, 1973)

Les agronomes distinguent souvent dans la porosité deux sous-systèmes :

— *une porosité structurale* due aux fissures délimitant les éléments structuraux,

— *une porosité mottière* propre aux éléments structuraux qui dans le cas d'une structure continue (fréquente en sols ferrallitiques) est assimilée à une porosité texturale.

Une telle distinction est importante lorsque l'on veut estimer les conséquences du travail du sol sur la porosité ; selon le degré d'humidité à ce moment-là, ce sera l'un ou l'autre des deux sous-systèmes qui sera modifié.

1.4. POROSITE FERMEE ET POROSITE OUVERTE

Outre les distinctions classiques entre microporosité et macroporosité, on peut définir également :

— *une porosité fermée* qui ne sert pas à la migration de l'eau (pores généralement de petite taille sans communication avec l'extérieur). Elle est habituellement comprise entre 5 et 10 % du volume des sols ferrallitiques.

— *une porosité ouverte* où l'eau circule sans difficulté ; on la mesure par l'humidité du sol après une forte pluie ou une irrigation abondante.

2. LES FACTEURS DE LA POROSITE

2.1. LA STRUCTURE

C'est un lieu commun de dire que la porosité d'un sol est intimement liée à la structure ; à tel point qu'étudier la porosité, c'est aussi définir un certain état structural par une autre méthode que l'étude directe de la structure. Les sols ferrallitiques ne font pas exception à cette règle ; les sols les mieux structurés sont également les plus poreux et la dégradation de la structure s'accompagne d'une baisse de la porosité globale.

C'est surtout la macroporosité qui dépend de la structure ; aussi la péjoration des caractéristiques structurales qui suit la mise en culture provoque-t-elle une diminution sensible de la macroporosité de l'horizon superficiel ; cette diminution a été chiffrée à un quart de la valeur initiale après quatre ans de culture mécanisée à Grimari en République Centrafri-

caine et à la moitié après quinze ans de culture dans le Campo Cerrado Brésilien (MOREL et QUANTIN, 1972 ; VAN WAMBEKE, 1974). La matière organique des sols joue un rôle essentiel, mais par l'intermédiaire de la structure dont elle est un facteur primordial ; la jachère ou les amendements organiques régénèrent donc la porosité en même temps que la structure.

2.2. LA TEXTURE

La texture n'a qu'une importance secondaire pour la macroporosité (1) ; par contre, elle conditionne étroitement la microporosité : plus un sol est riche en éléments fins (argile et limon), plus sa microporosité est importante.

Les sols ferrallitiques n'ont le plus souvent que fort peu de limon ; on peut donc relier microporosité et teneur en argile et constater, dans les sols d'état structural comparable, que la porosité globale est d'autant plus élevée que le sol est plus argileux (HUMBEL, 1974).

Autre conséquence : la microporosité est une valeur relativement stable car directement fonction de la granulométrie ; au contraire, la macroporosité peut varier fortement selon l'état structural, en particulier sous l'influence des traitements culturaux (MOREL et QUANTIN, 1972 ; MOURA cité par VAN WAMBEKE, 1974).

2.3. LE PEDO-CLIMAT

Des études récentes faites au Cameroun (HUMBEL, 1974) ont montré une variation de la porosité des horizons superficiels en fonction des conditions climatiques. Alors que dans le centre du Cameroun (Adamoua), le sol subit une forte dessiccation (pF inférieurs à 4,2) pendant une dure saison sèche de 5 mois, dans le sud de ce pays le sol reste constamment humide sous forêt faute de saison sèche bien nette ; on constate parallèlement une augmentation de la porosité totale en allant du nord vers le sud (Tableau V.2.).

TABLEAU V.2. — *Influence de la dessiccation du sol sur la porosité totale des horizons superficiels de sols ferrallitiques du Cameroun sous végétation naturelle d'après HUMBEL, 1974*

	Profondeur	Porosité volumique %
Adamoua (savane et forêt claire) saison sèche de 4 à 5 mois	0-5 cm	49 à 62
	10-15 cm	48
Sud Cameroun (forêt dense) pas de saison sèche nette	0-5 cm	70 à 80
	10-15 cm	52 à 61

A partir de 50 centimètres de profondeur, le phénomène s'inverse quelque peu et ce sont les sols qui subissent la dessiccation de surface la plus prononcée qui ont en profondeur la porosité la plus importante, sans atteindre, et de beaucoup, l'ampleur de ce qui se passe en surface. Le phénomène semble pouvoir se relier, au moins partiellement, à la pré-

(1) Toutefois, dans le cas de sols riches en sables grossiers, ces derniers peuvent avoir une certaine importance en augmentant la macroporosité, surtout si la structure est continue, cas fréquent dans les sols ferrallitiques.

TABLEAU V.3. — *Porosité totale de quelques horizons supérficiels de sols ferrallitiques*

Localisation	Pluviosité climat	Végétation ou culture	Sol Roche-mère	Profondeur en cm	Porosité totale %	Référence auteurs
Centre Cameroun Adamoua	1 600 mm Forte saison sèche (5 mois)	savane ou forêt sèche	sol rouge sur basalte ou gneiss	0-5 10-15	49-61 48	HUMBEL (1974)
Sud Cameroun	1 600 mm pas de saison sèche	forêt dense	sol jaune sur granite ou schiste	0-5 10-15	70 à 80 52 à 61	HUMBEL (1974)
Basse Côte d'Ivoire	1 800 mm saison sèche peu accusée	bananier	sol jaune sablo-argileux sur schiste	0-5	40 à 45	GODEFROY (1974)
Basse Côte d'Ivoire	2 050 saison sèche peu accusée	ananas	sol jaune sablo-argileux sur sable tertiaire	0-25	43 à 51	GODEFROY (1974)
République Centrafricaine	1 500 mm saison sèche (4 mois)	savane à Imperata	sol rouge sur gneiss	0-15	41 à 44	MOREL & QUANTIN (1972)
		culture mécanisée	sol rouge sur gneiss	0-15	37 à 40	
Sud Sénégal Casamance	1 100 mm saison sèche (7 mois)	riz pluvial grattage manuel sur 7 à 10 cm	ferrallitique faiblement désaturé	0-10	47	HADDAD & SEGUY (1972)
				10-20	41	
Brésil Central Campo Cerrado	1 400 mm forte saison sèche (6 mois)	culture	« latosol » sablo-argileux	0-13	64,4*	MEDINA & GROHMANN
		culture	« latosol » sableux	0-23	42,3*	MEDINA & GROHMANN cités par VAN WAMBEKE
Brésil Central	1 400 mm forte saison sèche	culture et savane arborée	oxisol	surface	42 à 72*	VAN WAMBEKE (1974)
Malaisie	2 000 mm	plante de couverture et hévéa	latosol	0-5 15-30	58 à 62 55 à 59	R.R.I.M. (1974)

* Valeurs obtenues par analyse micromorphologique.

sence de la vie animale dans ces sols ; alors que dans les zones constamment humides celle-ci se développe principalement en surface, elle se cantonne en profondeur dans les régions les plus sèches où elle n'est plus guère représentée que par les termites. Quoiqu'il en soit, on peut parler d'une « zonalité de la porosité » (HUMBEL, 1974) qui reflète les conditions de la pédogenèse.

3. CARACTERES GENERAUX DE LA POROSITE DES SOLS FERRALLITIQUES

3.1. LA POROSITE TOTALE

La porosité des sols ferrallitiques peut varier assez fortement mais atteint habituellement des valeurs élevées, plus élevées que dans beaucoup d'autres types de sols. C'est en surface que les variations sont les plus amples, de 41 % sous savane à *Imperata* à 70-80 % sous forêt dense sempervirente toujours humide (tableau V.3.). Le défrichement et la mise en culture provoquent très vite une baisse de porosité de 5 à 10 points, au moins dans les sols les plus poreux (HUMBEL, 1974).

L'amplitude de ces variations, naturelles ou provoquées, paraît plus directement liée à celles de la macroporosité, au moins en première approximation, qu'à celles de la microporosité qui, comme on l'a vu, est surtout déterminée par la texture.

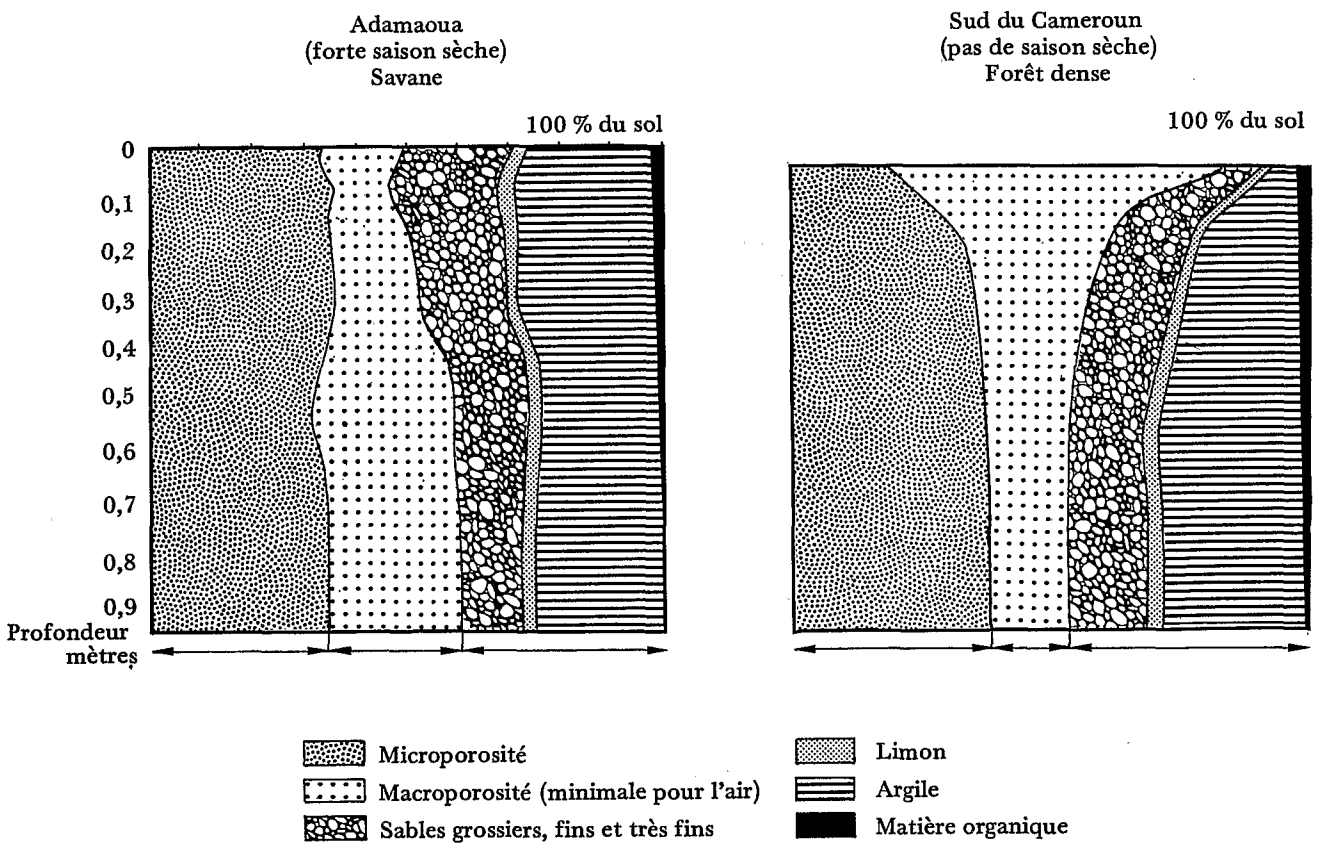
En profondeur (tableau V.4.) la porosité totale varie également, mais plutôt en fonction de la granulométrie : ainsi les sols ferrallitiques du Cameroun ont, entre 50 cm et 2 m de profondeur, des porosités allant de 46 à 67 % quand la teneur en argile passe de 50 % à 80 %.

TABLEAU V.4. — *Porosité totale et teneurs en argile de quelques profils de sols ferrallitiques sous végétation naturelle au Cameroun d'après* HUMBEL *(communication personnelle)*

Localisation	Douala	Ebolowa	Nanga-Eboko	Adamoua	Adamoua
Climat	pas de saison sèche	pas de saison sèche	saison sèche 3-4 mois	forte saison sèche 4-5 mois	forte saison sèche 4-5 mois
Pluviosité	2 500 mm	1 750 mm	1 600 mm	1 600 mm	1 600 mm
Végétation	forêt	forêt	savane	savane	forêt claire
Roche-mère	sédimentaire	granite	gneiss	gneiss	basalte
			Teneur en argile %		
Surface 0-15 cm	40	50	56	50	80
vers 50-100 cm	50	50	72	60	90
			Porosité totale %		
0-10 cm	58	73	67	54	60
10-50 cm	47	57	55	58	61
50-100 cm	46	54	59	62	67
100-200 cm	46	—	61	60,5	57

FIGURE 1

Porosité totale, microporosité, macroporosité de deux profils ferrallitiques du Cameroun sous végétation naturelle (d'après HUMBEL, 1974)



Des porosités totales de 42 à 47 % (1) paraissent normales à 1 m de profondeur dans le Campo Cerrado brésilien où les taux d'argile varient de 15 à 32 % (MEDINA et GROHMANN, cités par VAN WAMBEKE, 1974). Ces valeurs sont élevées, nettement plus fortes que celles que l'on trouve dans les horizons illuviaux des sols lessivés des pays tempérés (BENNEMA, JONGERIUS et LEMOS, 1970) (1).

3.2. VALEUR DE LA POROSITE DANS QUELQUES SOLS FERRALLITIQUES

a) Porosité des horizons superficiels

Les résultats exposés dans le tableau V.3. permettent de confirmer que les valeurs les plus faibles de la porosité apparaissent sous les climats les plus secs, dans les sols sableux et sous culture.

b) Echelonnement des valeurs de la porosité dans le profil (tableau V.4.)

Les valeurs de la porosité sont à peu près constantes à partir de 50 à 100 cm de profondeur dans un même type de sol pour une granulométrie donnée.

Par contre, la porosité superficielle peut varier énormément : on pourra avoir deux types d'échelonnement avec la profondeur :

— par valeurs décroissantes dans les sols sous climat humide bien couverts de végétation, donc avec une porosité de surface forte ;

— par valeurs croissantes dans les sols cultivés ou situés en climat à longue saison sèche où la porosité superficielle est la plus faible.

En fait, toutes autres conditions étant égales par ailleurs, lorsque le taux d'argile croît, c'est surtout la microporosité qui augmente, ainsi qu'on peut le constater sur les deux profils répertoriés au tableau V.5.

TABLEAU V.5. — *Porosité, macroporosité, microporosité de deux profils de sols ferrallitiques du Campo Cerrado brésilien d'après MEDINA et GROHMANN, cités par VAN WAMBEKE (1974)*

Profondeur en centimètres		Argile %	Porosité en % déterminée par la distribution des pores		
			Porosité* totale % du sol	Macroporosité* >50 microns % du sol	Microporosité* <50 microns % du sol
« Latosol » sablo-argileux	0-13	24,0	46,4	19,4	27,0
	13-41	25,5	46,5	16,5	30,0
	41,87	27,0	43,4	10,1	33,3
	87-120	32,0	46,8	16,0	30,8
« Latosol » sableux	0-23	13,1	42,3	25,1	17,2
	23-62	14,0	43,1	25,0	18,1
	62-120	15,0	47,3	27,7	19,6

* Porosité déterminée par étude micromorphologique.

(1) Valeurs obtenues par analyse micromorphologique alors que les précédentes le furent par des méthodes purement physiques.

Lorsque l'on possède des mesures de porosité très rapprochées sur un profil, on s'aperçoit qu'il existe parfois à faible profondeur (le plus souvent entre 15 et 70 cm) un sous horizon moins poreux d'épaisseur habituellement faible (15 à 30 cm) ; un tel horizon faiblement compacté, parfois appelé horizon de « consistance », se voit mal sur le terrain ; on a déjà signalé sa présence au chapitre II (différenciation des horizons pédologiques). On peut voir, sur le tableau V.6. qu'il retentit sur la porosité mesurée entre 25 et 35 cm dans un sol occupé par une vieille cacaoyère du sud du Cameroun.

TABLEAU V.6. — *Porosité d'un profil d'un sol ferrallitique fortement désaturé de cacaoyère au sud du Cameroun d'après* HUMBEL *(communication personnelle)*

Profondeur cm	Teneur en argile %	Porosité totale %*
0-5	50	64
5-10	52	53
10-20	52	52
25-35	56	48
50-60	59	52
70-80	62	51
100-200	60	50

* Porosité déterminée par des méthodes physiques.

4. LA POROSITE, LA MISE EN CULTURE ET LES FAÇONS CULTURALES

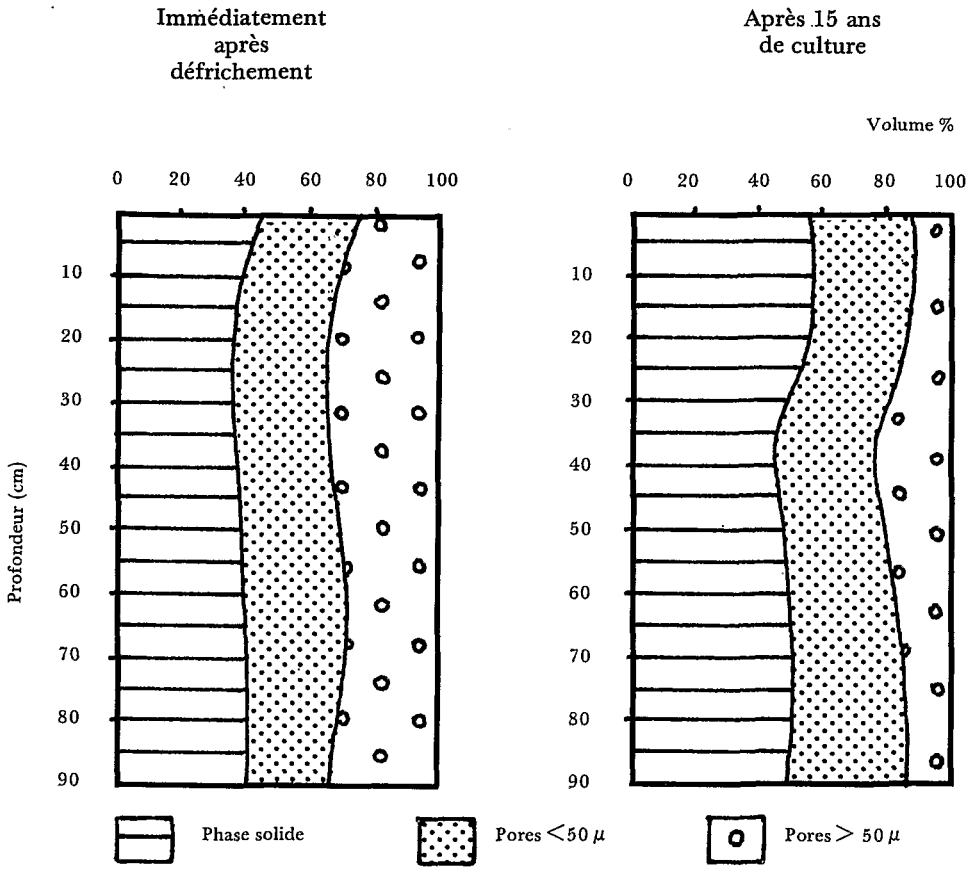
4.1. DIMINUTION DE LA POROSITE PAR LA CULTURE

Toute mise en culture retentit défavorablement sur la porosité des sols ; l'exposition directe au soleil et la dessiccation qui en résulte, le tassement dû au passage des hommes et des engins, la dégradation de la structure entraînent un abaissement de la porosité et, par voie de conséquence, de la perméabilité. Le défrichement suivi de cultures faites à la main fait ainsi diminuer en une année la porosité de 5 à 10 points (HUMBEL, 1974) dans les sols du Cameroun. C'est une diminution du même ordre de grandeur — 4 points de porosité — qu'enregistre FERREIRA (com. pers.) sur les « oxisols » des Tabuleiros du sud de l'Etat de Bahia à la suite d'un défrichement mécanisé de la forêt semi-décidue de cette région. Une étude réalisée en Côte d'Ivoire (vallée de Bandama) a montré que défrichement et 2 à 3 ans de culture semi-mécanisée provoquaient une baisse de porosité de 12 points en moyenne avec des variations locales assez larges (de BLIC, 1976).

Comme on pouvait s'y attendre, le phénomène affecte surtout la macroporosité alors que la microporosité reste pratiquement stable ; ainsi, dans un sol ferrallitique moyennement désaturé de GRIMARI (R.C.A.), quatre années de culture mécanisée font passer la macroporosité superficielle de 16 % du volume du sol sous jachère à 12 %, tandis que la microporosité ne varie guère (25 %). Même constatation faite par MOURA (*in* VAN WAMBEKE, 1974) dans les sols fortement désaturés du Campo Cerrado brésilien : si la microporosité varie peu en 15 ans de culture, la macroporosité diminue de moitié de 0 à 25 cm, de 10 à 20 % entre 25 et 60 cm, de 30 à 50 % de 60 à 90 cm de profondeur. On voit dans ce dernier exemple que la compaction consécutive à la mise en culture ne se limite pas à la classique semelle de labour, mais se répercute sur la porosité bien au-dessous

FIGURE 2

Variation de la porosité dans un sol ferrallitique (Latossolo Roxo) *à la suite de 15 ans de culture d'après* MOURA *cité par* VAN WAMBEKE *(1974)*



de la tranche de sol cultivé, jusqu'à 90 cm de profondeur au moins dans ce cas précis. Des faits similaires furent observés dans les sols ferrallitiques cultivés du sud du Sénégal par CHARREAU et NICOU (1971) et CHAUVEL (1972). Ces agronomes pensent non seulement à une répercussion en profondeur de l'effet cinétique des pluies, précédemment amorti par la végétation naturelle, mais aussi à une modification des conditions de pédogenèse qui retentirait en particulier sur la porosité et la compacité jusque sur les horizons profonds du profil (Figure 2).

PEDRO et CHAUVEL (1978) attribuent cette diminution de porosité à une ultra-dessiccation qui se produit en profondeur sur les sols cultivés privés de toute végétation pendant des saisons sèches particulièrement longues et dures comme en Casamance : l'eau des crypto-vides est évacuée et il se produit un ré-arrangement plasmique irréversible qui va dans le sens du compactage. A cette « agression physique », s'ajoute une agression physico-chimique due à la mobilisation et au départ de fer ferrique fixé par les argiles, d'où une destabilisation de la structure. On ne sait pas dans quelle mesure ce phénomène peut jouer sous des climats plus humides que celui de la Casamance.

Un exemple provenant de l'Amazonie centrale (région de Manaus), cité par CAMARGO et RODRIGUES (1979), permet de penser que les conséquences de la culture ne sont pas

toujours catastrophiques, loin de là, lorsque les caractéristiques de porosité sont excellentes au départs (tableau V.7.). Il s'agit ici d'un sol ferrallitique jaune fortement désaturé, très argileux (Latossolo amarelo álico distrófico dans la classification brésilienne), cultivé quelques années et, à la date de l'étude, incomplètement colonisé par un recru forestier assez lâche. Si on ajoute à cela que le climat de Manaus présente une saison sèche assez nette en juin, juillet et août, on a, réunies ici, plusieurs conditions destructrices de la porosité, et, pourtant, celle-ci reste excellente malgré une baisse (modérée) en surface.

TABLEAU V.7. — *Porosité et densité d'un sol ferrallitique jaune fortement désaturé (Région de Manaus — Amazonie brésilienne) d'après* CAMARGO *et* RODRIGUES *(1979)*

Horizon	Profondeur cm	Argile %	Densité en g/cm^3		Porosité totale volumique %
			Apparente	Réelle	
A_p	0-8	76	1,31	2,45	47
A_3	8-22		1,29	2,57	50
B_1	22-50	à	1,22	2,60	53
B_{21}	50-125		1,23	2,60	53
B_{22}	125-265		1,20	2,60	54
B_{23}	265-350	90	—	—	—

4.2. AMELIORATION TEMPORAIRE DE LA POROSITE PAR LE LABOUR

Alors que dans le paragraphe précédent, il était question d'une diminution à long terme de la porosité sous l'influence des façons culturales, on constate qu'à court terme, le labour provoque une amélioration substantielle des caractéristiques structurales et en particulier de la porosité.

Cette augmentation de la porosité est importante : elle peut atteindre 20 à 30 points immédiatement après le passage de la charrue, encore une dizaine de points après semis et levée des plantes en dépit de l'impact des pluies et du tassement provoqué par le passage des hommes et des engins. Mais elle est fugace : sa durée en fut chiffrée à 45 jours sous riz pluvial en Casamance dans des sols à vrai dire sableux et assez mal structurés (HADDAD et SEGUY, 1972) ; il est probable qu'elle est un peu plus importante dans d'autres sols, surtout s'ils sont en bon état structural.

Quoiqu'il en soit, l'amélioration de la porosité par le labour (1) permet une levée convenable des semis, un enracinement satisfaisant et en fin de compte des récoltes honorables, même si la structure est au départ déjà fortement dégradée. Lors d'une remise en culture, un nouveau labour « rénove » à nouveau la porosité (MOREL et QUANTIN, 1972), mais à un niveau inférieur au précédent s'il n'y a pas apport d'amendements organiques. Ces labours successifs ne sont évidemment efficaces qu'avec les traditionnelles précautions bien connues des agriculteurs : « prendre la terre » à un degré convenable d'humidité, éviter les tassements ultérieurs etc. (LE BUANEC, 1974).

L'amélioration de la porosité par les façons culturales, si elle diminue momentanément l'érosion hydrique peut paradoxalement la favoriser à terme : la couche superficielle se gorge d'eau lors des fortes averses et, désolidarisée du reste du profil, elle devient de ce fait plus sensible à l'entraînement par l'eau, au moins dans les sols sans végétation (ROOSE, 1973).

(1) Pourvu évidemment qu'il n'y ait pas exagération (terre creuse). Dans ce cas la graine adhère mal au sol et lève mal ; d'où l'intérêt du roulage.

4.3. LA MATIERE ORGANIQUE ET LA POROSITE

Les amendements organiques, surtout le fumier de ferme, permettent une amélioration durable de la macroporosité (la microporosité restant stable), ainsi que le confirme le tableau V.8. concernant des sols ferrallitiques de Grimari (R.C.A.), où les prélèvements furent faits systématiquement en pleine saison sèche, c'est-à-dire quelques mois après la fin du cycle cultural.

TABLEAU V.8. — *Variations de la macroporosité et de la perméabilité avec ou sans fumier à Grimari (R.C.A.) d'après* MOREL *et* QUANTIN, *1972*

	Macroporosité %	Perméabilité cm/h
Témoin (savane à Imperata)	16	50 à 80
Culture mécanisée pendant 4 ans sans fumier de ferme	12	peut décroître jusqu'à 5
Culture mécanisée pendant 4 ans avec fumier de ferme	23	25 à 30

N.B. La microporosité reste à la même valeur dans tous les objets : 26 %.

Par contre, ces auteurs sont très réservés sur les effets favorables des engrais verts (ici du maïs âgé de deux mois). Ceci pose à nouveau la question de la qualité de l'amendement organique. Il paraît cependant acquis que fumier de ferme, pailles et en général matières végétales partiellement lignifiées provoquent une amélioration notable des caractéristiques structurales.

4.4. LA JACHERE, LA PRAIRIE PATUREE ET LA POROSITE

Le procédé le plus utilisé sous les tropiques pour restaurer les caractéristiques physiques d'un sol, et partant la porosité, est la jachère sous toutes ses formes. Le relèvement du taux de matière organique, l'amélioration de la structure, le développement considérable de la vie dans le sol, tout cela entraîne une macroporosité accrue.

Bien que les études soient encore insuffisamment précises, il semble que la jachère forestière ait une certaine supériorité sur la jachère herbacée, sans doute parce que cette dernière brûle tous les ans, d'où une période pendant laquelle le sol n'est pas couvert, peut-être aussi parce que les touffes d'herbe des savanes laissent entre elles des couronnes où le sol est nu.

Toutefois, si l'on prétend intensifier la production agricole entre les tropiques, on est amené à préconiser l'emploi de jachères herbacées ou de prairies temporaires. Dans ce dernier cas, économiquement souhaitable, on peut se demander quel est le retentissement du piétinement du bétail sur la porosité. D'observations effectuées sur une prairie établie sur un oxisol de Porto-Rico et intensément pâturée pendant 18 mois, il résulte que le volume des plus grands pores diminue au maximum de 8,8 du pourcentage en volume et ceci pour les 3 pouces superficiels (7,5 cm) (CHANDLER et SILVA, *in* VAN WAMBEKE, 1974).

On a noté que le piétinement du bétail lors d'un pâturage très intensif faisait passer la densité apparente de 1,8 à 1,9 (différence significative) à Bouaké en Côte d'Ivoire.

En se référant à des expériences faites en Afrique Orientale, cette diminution n'a aucune influence sur les rendements des cultures des deux années suivantes, bien au contraire, même, puisqu'ils augmentent par rapport au témoin non pâturé.

Peut-on en conclure que les variations de porosité causées par le pâturage sont transitoires ou qu'une façon culturale de préparation suffit à rétablir des conditions de porosité favorables au cas où celles-ci auraient été détériorées par le piétinement du bétail ? Cette détérioration ne paraît actuellement nullement prouvée, et certaines expériences paraissent montrer le contraire.

5. LIMITATIONS AGRICOLES EN FONCTION DE LA POROSITE DU SOL

Grâce à un certain nombre d'études, on peut établir une échelle des porosités globales en fonction de la facilité avec laquelle les plantes cultivées peuvent développer leurs racines dans le sol (Tableau V.9.).

La limite inférieure de 40 % n'est pas particulière aux sols ferrallitiques ; elle est également valable pour la plupart des types de sols tempérés ou tropicaux. En fait, des porosités inférieures à 40 % sont rares dans les sols ferrallitiques non dégradés par la culture. Des porosités supérieures à 60 % ne sont pas toujours souhaitables ; elles peuvent engendrer, au moins pour certaines plantes, le phénomène de « terre creuse » bien connu des céréaliculteurs, ainsi que des tassements rapides préjudiciables aux radicelles. Des expériences de compaction réalisées en laboratoire ont même fixé vers 50 % l'optimum de porosité (SINGH et GUPTA, 1971), chiffre qu'il est sans doute imprudent de transposer tel quel sur le terrain. On a remarqué en effet, après sous solage, que des plantes comme le riz ou le caféier avaient tendance à concentrer leurs racines dans la partie du sol artificiellement remuée (effet dit du « pot de fleur ») et à négliger le sol voisin dont la porosité se situait pourtant à des valeurs en principe fort acceptables (42 à 46 %). On situe l'optimum de développement végétatif du manioc pour des porosités de 55 à 58 % dans les oxisols du sud de l'Etat de Bahia (FERREIRA, com. pers.).

Cette échelle ne tient pas compte des valeurs respectives de la microporosité et de la macroporosité ; aussi sera-t-il bon de la relever de quelques points pour les sols argileux où la microporosité tient une place prépondérante.

TABLEAU V.9. — *Porosité totale et limitations agricoles*

Porosité totale (en volume)	Limitations	Observations
< 40 %	forte	Mauvaise germination des semis Enracinement difficile
40 à 45 %	moyenne	
45 à 50 %	faible à nulle	
50 à 60 %	nulle	
> 60 %	forte à moyenne	Terre « creuse », peu favorable à l'enracinement

6. CONCLUSION

La porosité rend compte du volume disponible dans les sols ; décomposée en macroporosité et en microporosité, la première conditionne surtout la facilité de pénétration des racines et la perméabilité pour l'air, la seconde la rétention de l'humidité (microporosité).

Elle est déterminée essentiellement par la structure pour la macroporosité et par la texture pour la microporosité.

Si leur porosité globale est en général suffisante pour donner aux sols ferrallitiques des caractéristiques favorables aux plantes, elle est soumise à des influences contradictoires si ces sols sont cultivés :

— détérioration à long terme par les façons culturales

— régénération limitée dans le temps après un labour.

Même dans un sol couvert de végétation naturelle, la porosité n'est pas constante dans les sols ferrallitiques ; elle varie en fonction du taux d'éléments fins du sol mais aussi de la longueur et de l'intensité de la dessiccation à laquelle le sol est soumis (saison sèche plus ou moins accentuée, dénudation), donc du pédoclimat.

A ce titre, on peut dire que la porosité est un reflet des conditions de pédogenèse des sols ferrallitiques.

les propriétés hydriques

1. LES METHODES D'ETUDE

1.1. L'HUMIDITE DES SOLS

L'humidité des sols se mesure très simplement par *dessiccation de l'échantillon à l'étuve à 110°* (1) pendant 24 heures, laps de temps suffisant pour obtenir un poids constant.

Les modes de prélèvements peuvent être très variés, mais le plus usuel est la *tarière* qui permet d'échantillonner un sol jusqu'à une profondeur de deux mètres, largement suffisante dans la plupart des cas.

On peut faire deux reproches à l'utilisation de la tarière ; d'une part elle est difficile à employer dans les sols graveleux et inopérante dans les sols caillouteux malheureusement assez fréquents parmi les sols ferrallitiques ; d'autre part, le trou laissé dans le sol se colmate mal et fait mèche de dessiccation ou d'humectation suivant le cas, inconvénient surtout sensible lors des répétitions fréquentes sur des parcelles de petites dimensions.

Aussi tend-on à lui substituer *la sonde à neutrons* ; mesurant la réflexion, après ralentissement de ces particules, sur les atomes d'hydrogène de l'eau, cet appareil descendu dans un tube implanté une fois pour toutes dans le sol permet de tracer en continu les courbes d'humidité. La profondeur d'utilisation est théoriquement illimitée mais en fait limitée par la possession d'instruments de forage adéquats dont le plus usuel en pédologie reste encore... la tarière. La sonde à neutrons a pour principal avantage de permettre des mesures instantanées et continues sans perturber le matériau « sol ».

La méthode souffre de certaines limitations : malgré des progrès récents, elle manque encore de précision pour la partie superficielle du sol (0-15 cm) et ne fait pas de différence entre les ions hydrogènes de l'eau et ceux de la matière organique, d'où une correction à faire pour les sols humifères ; en outre ses composants électroniques se sont jusqu'à présent révélés assez sensibles aux conditions climatiques des régions tropicales, d'où la nécessité d'une « maintenance » dont ne dispose pas toujours l'expérimentateur.

La sonde à neutrons connaît une large utilisation à Madagascar, en Côte d'Ivoire etc. et son emploi est certainement appelé à se généraliser.

---

(1) Cette température de 110° est arbitraire et fut choisie bien avant que ne fussent bien connues les propriétés des argiles ; en effet, si celles-ci commencent à perdre leur eau de constitution seulement à partir de 150°, elles se débarrassent progressivement entre 80 et 140° d'une eau fortement liée, de telle sorte qu'il serait théoriquement préférable de choisir l'un ou l'autre de ces 2 chiffres. L'habitude veut que l'on conserve 110°. Cet inconvénient est sans grande conséquence dans les sols ferrallitiques à dominance de kaolinite.

Quant aux *méthodes tensiométriques et conductimétriques*, on a utilisé des résistances de nylon ou des blocs de plâtre pour déterminer la tension d'humidité des sols ferrallitiques en place ; les résultats en furent souvent décevants.

On expérimente actuellement en Afrique occidentale une nouvelle *méthode dite des chocs thermiques* : la transmission d'une onde de chaleur dans les sols permet de déterminer l'humidité de ceux-ci (POUYAUD et CHARTIER, 1971), en mesurant leur conductibilité calorifique.

1.2. TENSION D'HUMIDITE

On peut mesurer les caractéristiques hydriques en déterminant la relation entre la quantité d'eau présente dans le sol et l'énergie de liaison de cette eau, exprimée par le potentiel matriciel. Dans ce but, un échantillon de sol préalablement saturé d'eau est soumis, dans un récipient comportant une paroi semi-perméable, à une pression connue (exprimée en grammes/cm^2) : sous l'effet de cette pression, l'eau de l'échantillon est exprimée jusqu'à ce que l'équilibre soit réalisé entre l'eau retenue par le sol et la pression appliquée. On définit ainsi point par point une courbe liant le taux d'humidité du sol au potentiel matriciel du sol, ou mieux au logarithme de ce potentiel auquel on a appliqué la notation pF, par analogie avec le pH (qui est le logarithme d'une concentration) ; ainsi par exemple, pF 4,2 correspond à une pression de 15 bars et pF 2,4 à une pression de 300 millibars.

Centrifugation et succion sont encore utilisées dans certains cas. Mais le procédé de beaucoup le plus employé est celui de RICHARDS (1954) : on détermine, après vingt-quatre heures d'application d'une pression d'air donnée, l'humidité d'échantillons de sol placés sur une plaque poreuse ; bien que la méthode soit applicable à des échantillons non perturbés, la plupart des résultats exposés ici concernent une terre tamisée à deux millimètres.

Il faut noter que des conventions internationales déjà anciennes précisent que la centrifugation doit servir de référence à la détermination des pF ; moins souple et moins précise que celle de Richards, la méthode par centrifugation paraît peu à peu délaissée au profit de la première. Aussi ce sera surtout à celle-ci que se rapportent la plupart des chiffres de pF exposés dans ce chapitre.

1.4. DEFINITION DES CARACTERISTIQUES HYDRIQUES

Il semble utile de rappeler ici quelques définitions bien qu'elles soient valables pour tous les types de sol et pas seulement pour les sols ferrallitiques :

— *Le point de flétrissement :* lorsqu'un sol est soumis pendant vingt-quatre heures à une pression de 15 bars soit pF 4,2, il est par définition à son point de flétrissement ou de fanaison. Le point de flétrissement est une détermination réalisée en laboratoire mais qui correspond assez bien à ce qui se passe dans la nature (MACLEAN et YAGER, 1972). On observe toutefois des variations selon les espèces végétales. C'est ainsi qu'OBI (1974) a constaté que le « sunflower » et l'« okra » flétrissent à des pF correspondant respectivement à environ 18 et 32 bars lorsqu'ils sont cultivés en serre sur des sols forestiers du Nigéria. L'auteur reconnaît lui-même que l'Okra est un assez mauvais indicateur de pF.

— *La capacité au champ :* c'est une mesure de terrain ; lorsqu'un sol est engorgé d'eau à saturation (forte pluie ou arrosage abondant), on constate que son degré d'humidité baisse d'abord très vite, puis si lentement qu'il paraît stable ; la capacité au champ représente

la teneur en eau correspondant à la limite entre une décroissance à l'échelle de l'heure et une décroissance beaucoup plus lente à l'échelle de la journée ou de la semaine. Cette définition est imprécise et la limite quelque peu arbitraire ; la plupart des auteurs considèrent que vingt-quatre à quarante huit heures suffisent pour assurer le ressuyage du sol jusqu'à la capacité au champ. En fait, il semble que dans les sols perméables vingt-quatre heures soient une durée acceptable en surface et quarante-huit heures pour les horizons profonds (TALINEAU et LESPINAT, 1971, en basse Côte-d'Ivoire). Il faut évidemment allonger ces délais dans les sols à faible perméabilité pour tenir compte de la lenteur des mouvements de l'eau.

— *L'eau utile (ou disponible)* : c'est par définition la différence entre l'humidité au point de flétrissement et celle qui correspond à la capacité au champ. Il s'agit donc, en principe, de l'eau disponible pour les plantes dans le sol.

— *L'humidité équivalente* (mesure de laboratoire) : l'humidité équivalente correspond par définition à la teneur en eau d'un sol soumis à une centrifugation de 1 000 g pendant soixante minutes. On remplace parfois la centrifugation par une succion sous dépression d'un tiers d'atmosphère.

— *La capacité de rétention* (mesure de laboratoire) : c'est le maximum d'eau que retient le sol (tamisé à 2 mm) quand le drainage est assuré librement.

N.B. — L'humidité d'un sol s'exprime soit sous forme pondérale (% du poids du sol), soit sous forme volumique (% du volume de sol) ; dans ce dernier cas, chaque point d'humidité correspond à un millimètre de hauteur d'eau (pluie ou irrigation) par tranche de dix centimètres d'épaisseur de sol.

2. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DES SOLS FERRALLITIQUES

Des cinq caractéristiques énumérées dans le paragraphe précédent, on n'en retiendra que trois : le point de flétrissement, la capacité au champ et l'eau utile ; les deux dernières, relativement peu utilisées pour apprécier les propriétés hydriques des sols ferrallitiques, sont souvent accusées de ne pas correspondre à ce qui se passe en réalité sur le terrain.

2.1. LE POINT DE FLETRISSEMENT

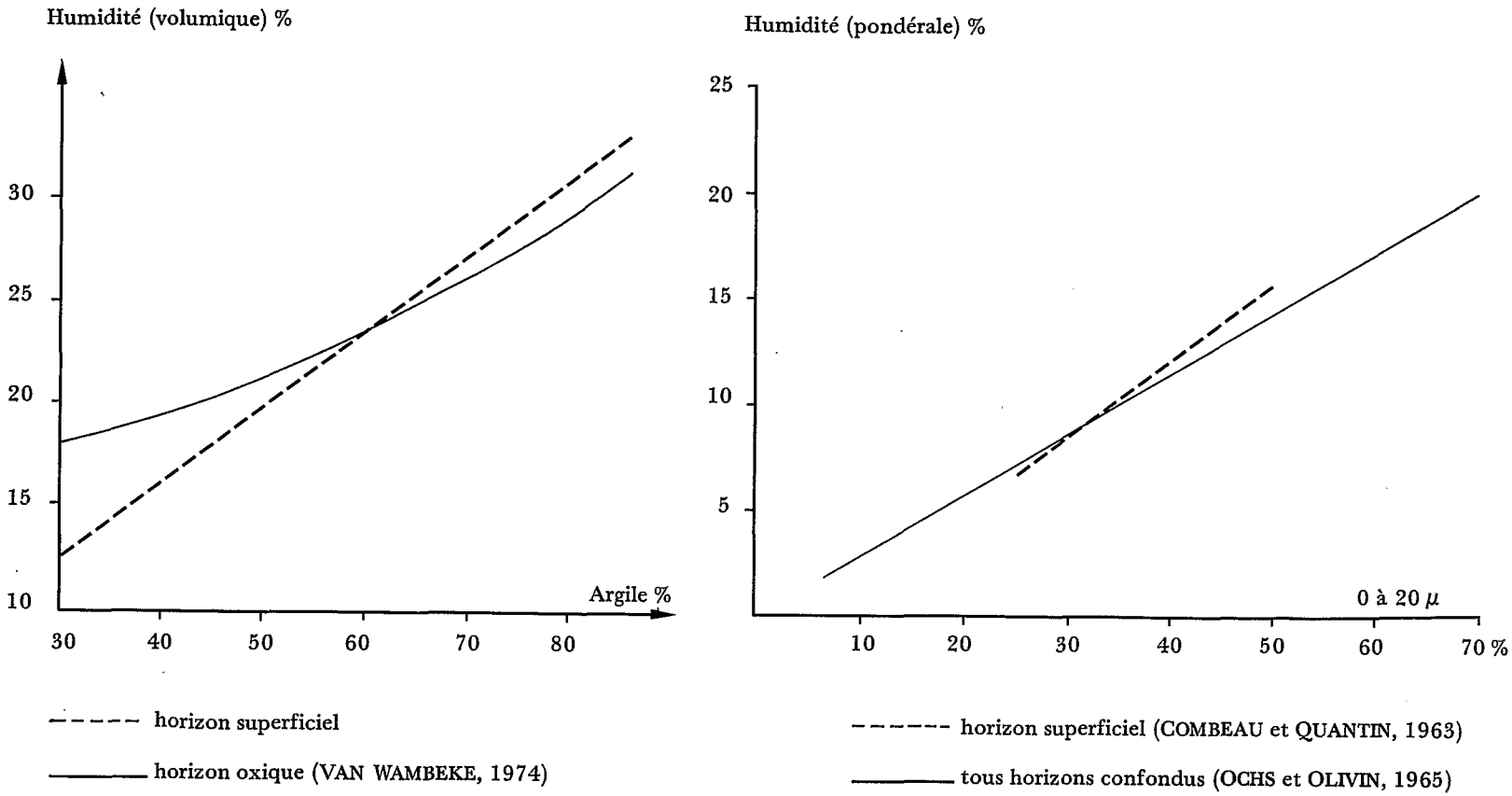
On a vu précédemment que le point de flétrissement est par définition la teneur en eau d'un sol à pF 4,2 et que cette valeur correspond assez bien à la fanaison permanente des plantes dans la nature.

L'humidité au point de flétrissement est constante pour un sol donné ; elle est directement fonction de la teneur du sol en éléments fins, argile et limon. En fait, comme le limon est habituellement faiblement représenté dans les sols ferrallitiques, on effectue souvent la corrélation avec le seul taux d'argile, l'équation de la droite de régression étant (VAN WAMBEKE, 1974) :

$$\text{Humidité \% pF 4,2} = 0{,}234\ \text{Arg \%} + 1{,}3 \qquad (r = 0{,}867)$$

Figure 3

Relation entre l'humidité au point de flétrissement (pF 4,2) et la teneur en éléments fins



Ainsi qu'on peut le voir sur la figure 3 les droites de régression des horizons supérieurs, toujours plus ou moins organiques, ne se confondent pas totalement avec celles des horizons profonds ; cette distorsion semble due à l'humus, dont le rôle exact est encore mal connu. Toutefois THOMANN (1963), étudiant les teneurs en eau à un certain nombre de pF (dont pF 4,2), précise que ces teneurs en eau dépendent plus de la matière organique humifiée que de la matière organique totale.

Etant donné sa liaison étroite avec la texture, l'humidité au point de flétrissement est constante pour un sol donné quel que soit son état structural. D'une façon générale, elle correspond à la « minimicroporosité » (chap. IV., p. 44), donc à l'eau contenue dans des pores de diamètre moyen inférieur à 0,2 micron.

2.2. LA CAPACITE AU CHAMP

On a souvent essayé de relier la capacité au champ, mesure de terrain, à une détermination de laboratoire plus aisée à mettre en œuvre. C'est ainsi qu'on a voulu parfois l'assimiler à l'humidité équivalente, assimilation qui s'est révélée illusoire. Plus souvent on a tenté de rechercher un pF caractéristique, et c'est bien souvent pF 2,5 (300 millibars) qui fut choisi (MEDINA et GROHMANN, 1966 au Brésil), parfois pF 2,7 soit 500 millibars (CROEGAERT et *al.*, 1954 au Zaïre). En fait il apparaît que les pF correspondant à la capacité au champ sont en corrélation linéaire positive avec les teneurs en éléments fins, argile et limon (0-20 microns), la droite de régression étant la suivante selon COMBEAU et QUANTIN (1963 - a) :

$$pF \text{ capacité au champ} = 0{,}038\ (A + L)\ \% + 1{,}5 \qquad (r = 0{,}771)$$

Toutefois ces auteurs reconnaissent que, pour un taux déterminé d'éléments fins, les valeurs de pF les plus élevées correspondant à la capacité au champ sont associées aux teneurs les plus fortes en humus et, quoique d'une façon moins nette, aux indices d'instabilité structurale les plus élevées. Le calcul conduit à l'expression suivante :

$$pF \text{ capacité au champ} = 0{,}038\ (A + L)\ \% + 0{,}28\ (\text{humus } ‰) + 0{,}12\ Is + 65$$

avec des coefficients de FISCHER de

(Argile + Limon) %	$t1 = 6{,}807$	$P < 0{,}001$
Humus ‰	$t2 = 2{,}486$	$P < 0{,}025$
Indice d'instabilité Is	$t3 = 1{,}997$	$P < 0{,}1$

Ce rôle de la matière organique avait déjà été perçu par GROEGAERT et *al.* (1954) dans les sols du Zaïre en grande majorité ferrallitiques ; il est également pris en compte par PIDGEON (1972) pour les sols ferrallitiques de l'Ouganda en reliant la teneur en eau à la capacité au champ aux taux de matière organique, de limon et d'argile par l'équation de régression suivante :

$$\text{Humidité \% capacité au champ} = 7{,}38 + 0{,}16 \text{ limon \%} + 0{,}30 \text{ Argile \%} + 1{,}5 \text{ M.O. \%} \qquad (r = 0{,}964)$$

Un tel résultat est assez largement discuté par OCHS et OLIVIN (1965), bien que les paramètres en cause ne soient pas exactement les mêmes : la courbe des teneurs en eau à la capacité au champ qu'ils ont dressée pour les sols du sud du Dahomey n'est régulièrement croissante en fonction du pourcentage d'argile et de limon que si le taux d'éléments fins ne dépasse pas 30 à 40 % ; elle s'incurve ensuite de telle sorte que, vers 70 à 80 %, elle tend à rejoindre la droite des humidités au point de flétrissement (fig. 4.). Ce phénomène serait dû principalement à la nature de l'argile des sols ferrallitiques toujours à forte dominance de kaolinite ; de ce fait, la capacité au champ de ces sols serait si largement indépendante du taux d'argile qu'on pourrait la qualifier de « structurale » (OCHS et OLIVIN, op. cit.).

Cette affirmation ne laisse pas de surprendre si l'on se rappelle que l'eau retenue à la capacité au champ l'est dans des pores de diamètre équivalent moyen inférieur allant de 3 microns (sols sableux) à 30 microns (sols argileux), du moins en première approximation. Il est vrai que les sables, et surtout les sables fins, peuvent jouer un rôle important dans la rétention d'eau.

En guise de conclusion, il paraît utile de se souvenir que de très nombreux travaux ont montré, tant dans les sols tempérés que dans les sols ferrallitiques, l'inanité de vouloir mesurer la capacité au champ à pF constant (COMBEAU et QUANTIN, 1963, en République Centrafricaine ; MACLEAN et YAGER, 1972, en Zambie, entre autres). Quant aux équations de régression proposées, elles ne peuvent, au mieux, que donner des approximations. Seule la détermination au champ reste valable. Et encore cette mesure n'est pas exempte de difficultés : c'est ainsi que COMBEAU et QUANTIN (op. cit.), MACLEAN et YAGER (op. cit.) concluent qu'il vaut mieux l'effectuer en saison humide qu'en saison sèche si l'on veut éviter des erreurs par sous-estimation.

2.3. L'EAU UTILE

C'est par définition la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et celle mesurée au point de flétrissement.

On considère habituellement que les sols sableux ont un domaine d'eau utile relativement réduit en raison de leur faible capacité de rétention ; il est également faible pour les sols très argileux, cette fois parce que l'humidité à pF 4,2 y est très élevée.

Or, OCHS et OLIVIN (1965) ont trouvé que l'eau utile des sols ferrallitiques appauvris du sud du Dahomey était une fonction linéaire décroissante du taux d'argile (1) du sol, la droite de régression pour cette excellente corrélation étant :

Eau utile % = — 0,114 argile % + 11,218 (r = 0,951).

Donc, pour ces agronomes, les sols sableux sont ceux qui ont le domaine d'eau utile le plus étendu, conclusion discutée par d'autres auteurs. PIDGEON (1972), à propos des sols ferrallitiques de l'Ouganda, préconise l'équation de régression :

Eau utile (2) = 184,5 — 2,00 argile % + 3,57 M.O. % (r = 0,853).

MACLEAN et YAGER (1972) ont proposé pour les sols de Zambie, où les sols ferrallitiques (oxisols suivant la Soil Taxonomy) sont bien représentés dans les zones les plus humides, une équation de régression faisant intervenir les pourcentages de limon, de sables fins, ainsi que le carbone organique et la profondeur ; les coefficients variant quelque peu suivant que l'on utilise la granulométrie I.S.S.S. ou celle de l'U.S.D.A.

I.S.S.S.

Eau utile % = 0,5546 + 0,0295 (Si) + 0,0155 (F.S.) + 0,1869 (O.C.) — 0,0024 (D) (r = 0,858, S = 0,212)

U.S.D.A.

Eau utile % = 0,6060 + 0,0250 (Si) + 0,0131 (F.S.) + 0,165 (O.C.) — 0,0026 (D) (r = 0,873, S = 0,195)

Si = % limon (silt), FS = % sables fins (fine sand), O.C. = % carbone organique (organic carbon), D = profondeur en cm (depth).

---

(1) GROEGAERT et *al.* (1954) ont trouvé que l'eau utile était plus fonction de la teneur en limon que de celle d'argile. Il est vrai que l'utilisation systématique de pF 2,7 pour déterminer la capacité au champ fausse les résultats.

(2) Eau utile exprimée en millimètres par mètre de sol.

3. VALEUR DE L'EAU UTILE ET DISPONIBILITE POUR LES PLANTES

3.1. QUELQUES VALEURS DE L'EAU UTILE

Campo-Cerrado – Etat de Sao Paulo (Brésil)

MEDINA et GROHMANN (1966) ont déterminé les valeurs de l'eau utile par tranches de 40, 80 et 120 centimètres d'épaisseur de trois types de sols ferrallitiques du Brésil bien différents par leur texture (tableau VI.1).

TABLEAU VI.1. – *Caractéristiques hydriques de trois sols du Campo-Cerrado Brésilien d'après MEDINA et GROHMANN (1966)*

Type de sol	Teneurs moyennes en Argile + Limon %		Epaisseur de la tranche de sol	Humidité exprimée en % volume du sol (en mm de pluie)		
				Capacité au champ pF 2,54	Point de flétrissement pF 4,2	Eau utile
Latosol sableux	Surface	12 %	0-40	54,5	23,0	31,5
	vers 40 cm	14 %	0-80	107,5	47,5	60,0
	vers 1 m	16 %	0-120	166,5	72,0	94,5
Terre franche (« Solos Barrentos »)	0-20	25 %	0-40	103,0	44,5	58,5
	20-40	26 %	0-80	200,5	94,5	106,5
	40-80	31 %	0-120	306,5	149,0	157,5
	80-120	32 %				
Latosol argileux	Surface	61 %	0-40	27,6	91,6	36,0
	vers 40 cm	66 %	0-80	251,0	177,6	73,4
	vers 80 cm	66 %	0-120	364,0	257,6	106,4
	vers 120 cm	67 %				

L'eau utile se trouve à peu près également répartie dans tout le profil de chaque type de sol, vues les faibles différences de textures sur les 120 premiers centimètres.

En récapitulant par tranche de 10 cm de sol, on a en moyenne sur 120 cm :

Latosol sableux ..... 7,8 mm d'eau utile
Terre franche ..... 13,1 mm d'eau utile
Latosol argileux ..... 8,8 mm d'eau utile

La terre franche a ici une supériorité incontestable sur les sols sableux et argileux. Malheureusement la capacité au champ fut déterminée systématiquement sous pression de 300 g (pF 2,54) ; si l'on en croit les auteurs précédemment cités, ce procédé serait seulement valable pour la terre franche (Argile + Limon compris entre 20 et 30 %), mais donnerait des valeurs par défaut pour les sols sableux et par excès pour les sols argileux.

Dans les exemples suivants, on a mesuré la capacité au champ sur le terrain après ressuyage.

Figure 4

Domaine de l'eau utile sur trois mètre de profondeur dans deux sols du sud du Dahomey d'après OCHS *et* OLIVIN, *1965*

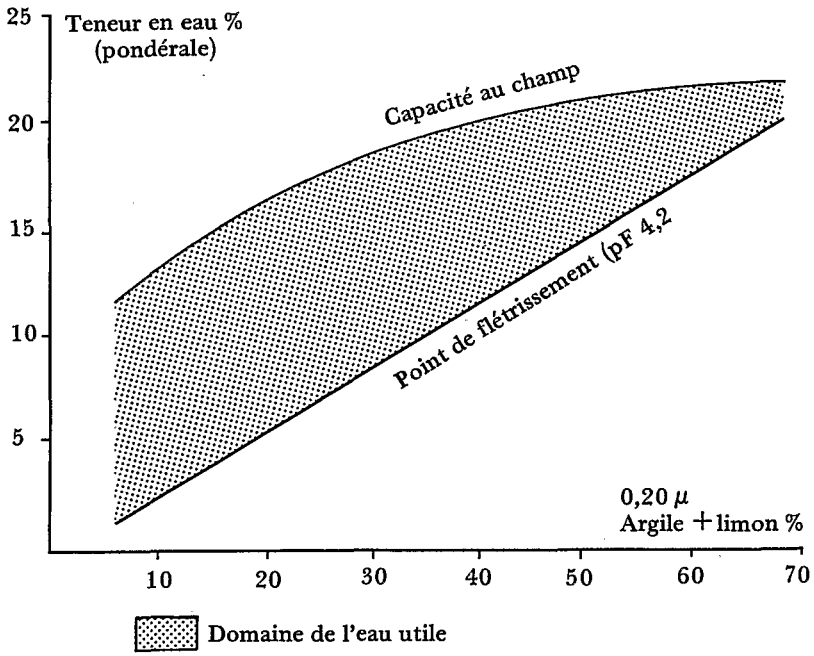
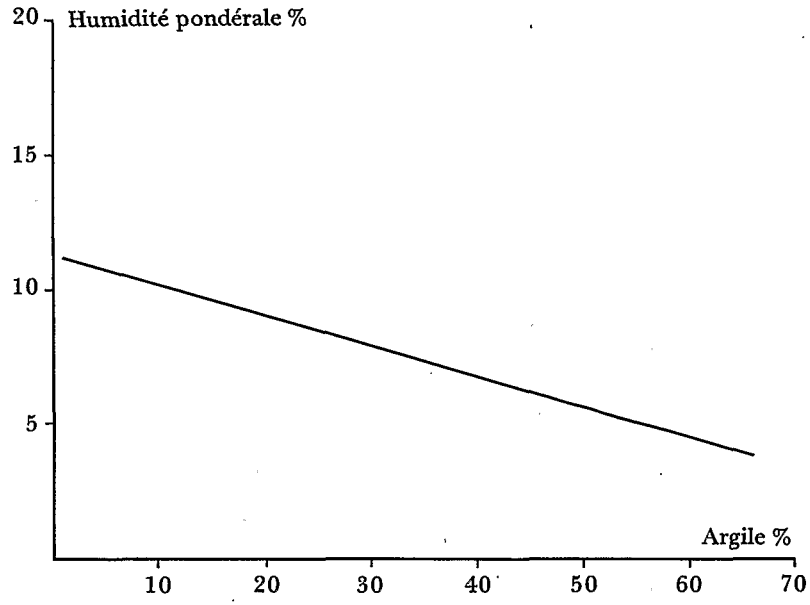


Figure 5

Relation entre l'eau utile et la granulométrie (0 à 2 μ) d'après OCHS *et* OLIVIN, *1965*



Dahomey (OCHS et OLIVIN, 1965)

Déjà dans les paragraphes 2.2. et 2.3., on a mentionné ces deux sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris en argile ; leurs granulométries sont fort différentes entre 40 cm et 1 mètre ainsi que l'on peut s'en rendre compte par le tableau VI.2. où sont indiquées les teneurs en argile de quelques horizons ou sous-horizons repères ; la terre de Barre n'est sableuse que jusque vers 50 cm, alors que le sol beige l'est encore à 1 mètre de profondeur (tableau VI.2., figure 4).

TABLEAU VI.2. — *Eau utile et teneur en argile % dans deux palmeraies du sud du Dahomey d'après OCHS et OLIVIN, 1965)*

	Eau utile sur 3 mètres en mm	Profondeur en centimètres 0-10	30-40	60-70	90-100	120-130	180-190	240-250	300
		Teneur en Argile %							
Terre de Barre	300	6,5	5,5	40,5	49,5	51,7	55,5	56,5	47,5
Sol beige	420	5,7	9,0	3,0	15,2	24,2	37,5	47,5	59,2

Or ces sols ont des domaines d'eau utile de 300 mm pour la terre de Barre et 420 mm pour le sol beige sur un profil de 3 mètres, soit respectivement une valeur d'eau utile moyenne de 10 mm et 14 mm par tranche de 10 cm de sol ; le sol le plus sableux a donc une supériorité incontestable en ce qui concerne l'eau utile.

Côte d'Ivoire (BOYER Ja., 1964)

Un sol argilo-sableux sur schiste de Côte d'Ivoire, planté en caféier possède 150 mm d'eau utile en moyenne sur une profondeur de 1 m, soit 15 mm par tranche de sol de 10 cm, valeur qui se retrouve à peu près constante du haut en bas du profil.

Sénégal - Casamance (HADDAD et SEGUY, 1972)

Le sol rouge de Casamance, sableux en surface, plus argileux en profondeur, peut contenir en moyenne 160 mm d'eau utile sur un mètre de profondeur, mais celle-ci est répartie pour un tiers de 0 à 50 mm et pour les deux tiers de 50 cm à 1 mètre.

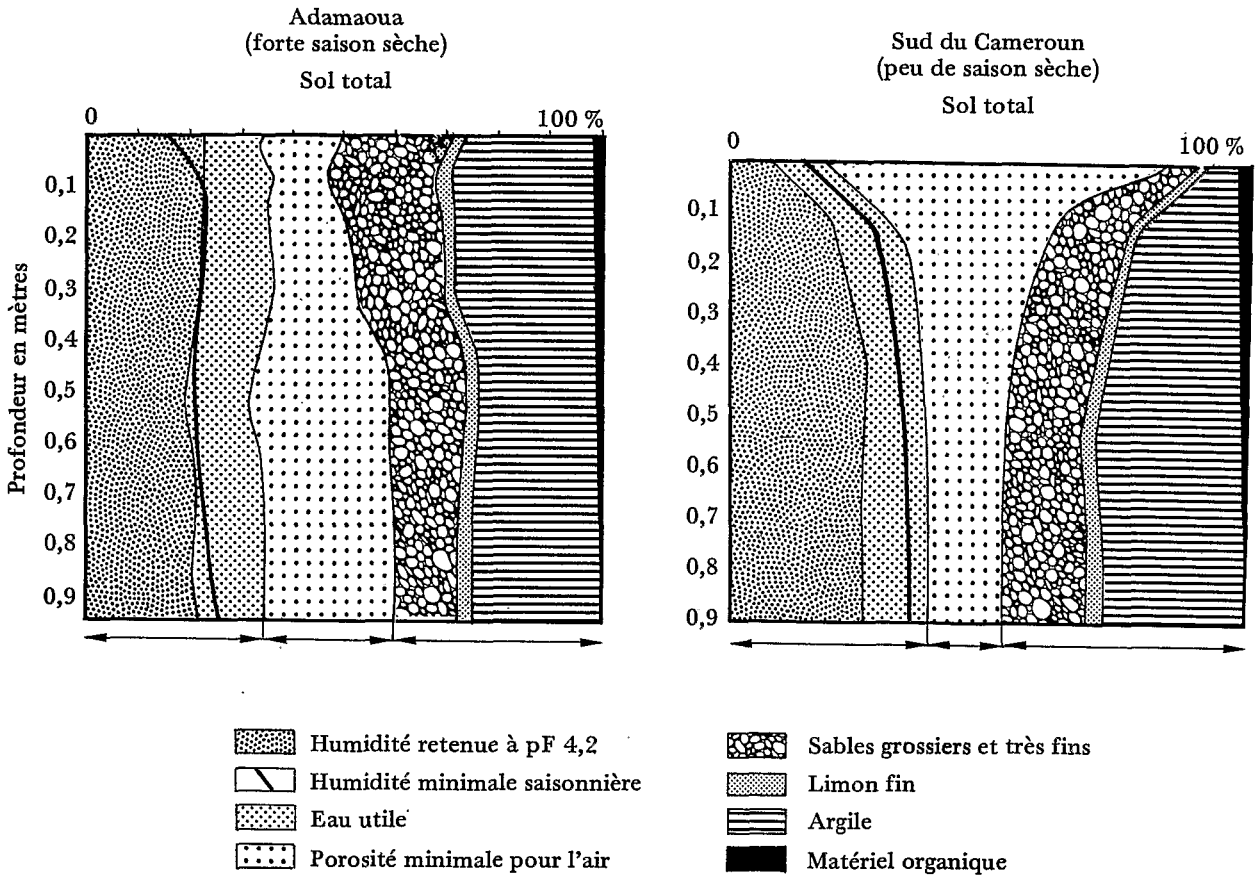
A noter que, sur des sols analogues et dans la même région, on a seulement trouvé une réserve en eau utile de 80 à 100 mm sur 1 mètre de profondeur (CHARREAU et FAUCK, 1970).

Cameroun (HUMBEL, 1974, figure 6)

A propos de travaux effectués sur la porosité et la compacité des sols du Cameroun, HUMBEL définit les domaines d'eau utile dans deux sols ferrallitiques fortement désaturés soumis à des conditions écologiques bien différentes : l'un subit une rigoureuse saison sèche (Adamaoua), l'autre est situé dans une zone équatoriale toujours humide (Sud Cameroun), bien que la pluviosité globale soit la même (1 600 mm) ; malgré cela l'eau utile a la même valeur rapportée au volume du sol, soit 14 à 15 mm tout le long du profil, avec toutefois une légère diminution dans les dix premiers centimètres, diminution surtout

Figure 6

Diagramme volumique montrant le domaine d'eau utile dans deux sols du Cameroun d'après HUMBEL *(1974)*



sensible en région humide (11 mm) en raison de la très forte porosité pour l'air dans la tranche superficielle du sol.

Indes (ANAND REDDY et *al.*, 1978)

Dans un sol ferrallitique du Deccan central (argile 16 %, limon 19 %, sables fins 6 %, sables grossiers 58 %), la différence entre le point de flétrissement (mesuré à 15 bars) et la capacité au champ (mesurée sur le terrain), donne, pour les 60 centimètres superficiels, une réserve en eau utile de 67 à 98 mm suivant les saisons.

En récapitulant ces données éparses

On peut conclure que l'eau utile peut varier de 5 à 15 mm de pluie par tranche de sol de 10 cm d'épaisseur, les valeurs les plus courantes se situant en gros entre 10 et 14 mm.

Ce stock d'eau utile est bien évidemment dû à la microporosité du sol et, comme cette dernière, il est en étroite corrélation avec la texture, les sols relativement sableux ayant une quantité d'eau utile supérieure à celle des sols argileux.

3.2. DISPONIBILITE DE L'EAU UTILE POUR LES PLANTES

On a vu précédemment que, selon OCHS et OLIVIN (1965), les sols sableux sont ceux qui ont le domaine d'eau utile le plus étendu.

Or ces deux auteurs, étudiant la consommation de l'eau du sol par l'*Elaeïs guineensis*, estiment qu'il faut introduire une certaine correction au désavantage des sols sableux, par la notion de « rendement » en eau utile (tableau VI.3).

TABLEAU VI.3. — *Réserve du sol en eau utile et consommation réelle de l'Elaeïs au Dahomey d'après OCHS et OLIVIN, 1965*

	Sol « argileux » (1) (Terre de Barre)	Sol « sablo-argileux » (1) (Sol beige)
Réserve théorique en eau utile sur 3 mètres	300 mm	420 mm
Eau effectivement utilisée en saison sèche par l'*Elaeïs guineensis*	300 mm	380 mm

(1) Il paraît nécessaire de préciser à nouveau les termes « sol argileux » et « sol sablo-argileux » employés par OCHS et OLIVIN.

Le sol « argileux » est, en fait, franchement sableux (6 % d'argile) jusqu'à 50 cm, puis de 50 cm à 3 mètres nettement argileux (50 % d'argile).

Le sol « sablo-argileux » est sableux (6 % d'argile) jusqu'à 80 cm, puis sablo-argileux de 80 cm à 2 mètres (teneur en argile passant progressivement de 15 % à 40 %) et enfin argileux au-delà de 2 mètres (plus de 40 % d'argile).

Cette « relativité » dans les définitions explique sans doute des « anomalies » que des spécialistes pourraient relever dans l'expérience d'OCHS et OLIVIN (op. cit.).

Alors que les palmiers à huile épuisent totalement l'eau utile en sol « argileux », ils laissent pour compte quarante millimètres en sol « sablo-argileux » ; il est nécessaire, en plus, de corriger en hausse ce dernier chiffre, car trente millimètres semblent être absorbés en état de souffrance, donc sans grand profit pour la production. Le supplément d'eau utile effectivement utilisable en sol « sablo-argileux » se réduit donc à cinquante millimètres au lieu des cent vingt théoriquement disponibles ; et ceci malgré un développement des racines nettement plus dense et plus profond dans le deuxième type de sol que dans le premier.

En conclusion on peut dire que malgré un « rendement » d'eau utile relativement défavorable, les sols à caractère sablo-argileux ont tout de même une certaine supériorité sur les sols plus argileux (soit 50 millimètres dans l'exemple cité plus haut).

Peut-être faut-il chercher l'explication de ce moindre rendement dans les phénomènes de diffusion de l'eau à l'intérieur du sol : les films d'eau qui assurent la mise en contact de l'eau des pores avec les surfaces absorbantes des racines sont sans doute de plus en plus sensibles à la rupture lorsque la teneur en argile décroît (OCHS et OLIVIN, op. cit.). En poussant jusqu'au bout ce raisonnement, on peut admettre que dans les sols ferrallitiques sableux à la fois en surface et en profondeur (ce qui n'était pas le cas des deux sols du Dahomey cités plus haut), la rupture des films d'eau intervient très tôt au cours du dessèchement et que la mise à la disposition de l'eau utile ne se fait qu'avec un très mauvais rendement par rapport aux réserves théoriques.

On rejoint ainsi les conclusions de nombreux auteurs qui accordent aux terres franches une nette supériorité pour l'eau utile par rapport aux sols franchement sableux ou franchement argileux.

3.3. EVALUATION DU STOCK D'EAU UTILE DU SOL (EAU DISPONIBLE POUR LES PLANTES)

La formule de Hallaire (1961) permet de calculer le stock d'eau disponible lorsque l'humidité du sol s'abaisse de la capacité au champ au point de flétrissement :

$$Q = (Z + 15)\frac{Da}{10}(H_0 - H_1)\,\Delta Z$$

où H_0 % = humidité à la capacité au champ
H_1 % = humidité au point de flétrissement
ΔZ = épaisseur en centimètres de l'horizon considéré
Da = densité apparente moyenne de l'horizon considéré
Z = profondeur en centimètres atteinte par les racines
15 = terme correctif destiné à tenir compte des remontées capillaires.

En bonne logique, il faudrait distinguer le stock disponible, notion statique, de la réserve utile, notion dynamique, parce qu'elle varie au cours de la vie de la plante puisque les racines explorent des tranches de sol de plus en plus profondes, de la germination à la maturité. Dans la pratique, on confond ces deux notions.

3.4. L'EAU UTILE ET LES BESOINS DES PLANTES

Faisant abstraction de la qualité du sol, on prendra ici arbitrairement une valeur de l'eau utile de 10 mm par tranche de sol de 10 centimètres d'épaisseur ; et, ainsi, on estimera grossièrement les services rendus à la plante par la réserve d'eau du sol.

Le maïs absorbe en conditions optimales (irrigation) environ 380 millimètres d'eau pour une période de végétation de 110 jours soit une moyenne de 3,5 millimètres par jour : les racines s'étendant sur à peu près 40 centimètres de profondeur, il disposerait dans un sol à la capacité au champ en principe de 12 jours de consommation normale d'eau entre deux pluies. En fait cette moyenne n'a pas grande signification, car le maïs, dont les besoins sont quasi nuls en fin de cycle, consomme 5 millimètres par jour du trentième au soixantième jour (BOUCHY, 1969) ; un développement optimal ne pourrait donc avoir lieu à ce moment là que si deux pluies successives ne sont pas espacées de plus de huit jours.

On classe les sols de Malaisie en fonction de l'eau utile du mètre supérieur de la façon suivante :

— « favorables » à la culture de l'hévéa, ils ont plus de 150 mm d'eau utile ;

— « avec limitations mineures », pour des teneurs en eau utile entre 100 et 150 mm ;

— « avec fortes limitations » pour des teneurs en eau utile entre 50 et 100 mm ;

— « avec très fortes limitations » (défavorables) s'ils ont moins de 50 mm d'eau utile (CHAN HEUN YIN et *al.*, 1977).

Le palmier à huile a des besoins en eau estimés en gros à 150 mm par mois (OCHS, 1968) ; ses racines plongeant à au moins trois mètres de profondeur, cet arbre n'est assuré de trouver suffisamment d'eau que pendant seulement environ deux mois sans pluie.

Ces exemples, bien que basés sur des données quelque peu arbitraires, mettent en relief le rôle pour les plantes de l'eau utile présente dans le sol.

Ils soulignent aussi les contraintes imposées à l'agriculteur :

— choisir les sols les mieux pourvus en eau utile. Ainsi le choix de sols appropriés au sud du Dahomey permet de réduire de 50 à 20 le nombre de jours de sécheresse physiologique (jours à stomates fermés) pour le palmier à huile, ce qui a pour conséquence une doublement du rendement en huile (OCHS, 1963).

— semer les plantes annuelles de façon à ce que leurs plus forts besoins en eau coïncident avec la période où habituellement les pluies sont régulièrement réparties.

— améliorer les caractéristiques physiques du sol et en particulier la porosité afin que les racines puissent explorer le volume le plus grand possible de sol et parer ainsi aux risques de sécheresse prolongée.

On peut ajouter que des essais d'irrigation, même dans des climats réputés humides comme la basse Côte d'Ivoire, ont donné d'excellents résultats, en particulier sur palmier à huile (OCHS, 1968).

4. LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SOL

4.1. CLIMAT : PRECIPITATIONS – EVAPOTRANSPIRATION

Si l'on fait abstraction de quelques sols considérés comme des relictes car formés sous un climat autrefois plus humide, on peut considérer que le domaine des sols ferrallitiques s'étend de part et d'autre de l'équateur sur la ceinture la plus chaude et la plus humide du globe terrestre. D'où deux conséquences :

— une pluviosité annuelle (P) élevée : au minimum 900 à 1 000 mm, couramment 1 200 à 3 000 mm, parfois jusqu'à 10 et 15 mètres ;

— une évapotranspiration potentielle (E.T.P.) également forte mais souvent freinée par la nébulosité élevée de beaucoup de ces régions.

Il n'entre pas dans ce propos de décrire ici les divers types de climats répertoriés sous les tropiques humides, mais on en retiendra l'incidence sur le sol et sur la croissance des plantes telle qu'elle est décrite par FRANQUIN (1967 et 1973). Cet auteur distingue *trois périodes de végétation active* :

— *une période préhumide* qui correspond à une première humectation du sol sec et nu, suffisante pour permettre la germination des plantes. Elle commence lorsque la quantité de pluie est supérieure à la moitié de l'évapotranspiration potentielle (1/2 E.T.P.). Il s'agit là d'une constatation empirique faite sur le terrain. La période préhumide précède la période suivante de huit à vingt jours.

— *une période humide* où les précipitations sont nettement supérieures à l'évapotranspiration ; le sol met alors de l'eau en réserve et évacue le surplus par drainage.

— *une période post-humide* pendant laquelle les plantes vivent essentiellement sur les réserves de sol jusqu'à leur épuisement si aucune pluie ne vient les réapprovisionner.

Les graphiques ci-joints (figure 7) permettent de différencier grossièrement trois zones climatiques qui couvrent à peu près l'aire d'extension des sols ferrallitiques :

1. *une zone équatoriale* où la pluviosité n'est inférieure à l'évapotranspiration potentielle ($P < ETP$) que peu de temps, 1 à 3 mois, pendant lesquels elle ne descend jamais au-dessous de la moitié de l'ETP. Il n'y a pratiquement jamais d'arrêt végétatif et les plantes ont à peine besoin de puiser dans les réserves du sol (cas de la Guyane).

2. *une zone subéquatoriale* où $P < 1/2$ ETP pendant 1 à 2 mois ; malgré le stock d'eau emmagasiné dans le sol, il y a un net ralentissement végétatif, mais de courte durée (Abidjan en Côte d'Ivoire).

3. *une zone tropicale* où $P < 1/2$ ETP pendant plusieurs mois, d'où un épuisement de l'eau utile durant une période plus ou moins prolongée (Bouaké et Odienne en Côte d'Ivoire).

Sans irrigation les cultures pérennes ne sont donc rentables a priori que dans les zones équatoriales et subéquatoriales, la zone tropicale ne pouvant admettre que des plantes supportant bien la sécheresse (anacardiers, manguiers, théiers etc.). Quant aux plantes annuelles, s'il est théoriquement possible de les cultiver toute l'année en zone équatoriale, leur cycle végétatif doit se limiter aux trois périodes de « végétation active » définies par FRANQUIN dans les deux autres zones ; ceci n'impose pas de contraintes excessives puisqu'à Bouaké il est encore possible de faire deux cycles culturaux et qu'à Odienne, pourtant situé à la limite de la zone de ferrallitisation, la période de végétation active s'étend sur plus de 6 mois.

En pratique il existe une limitation autrement dangereuse : il s'agit des irrégularités de pluviosité. Ainsi on a remarqué que trois semaines de sécheresse survenant en Casamance (sud du Sénégal) en Août, c'est-à-dire pratiquement au milieu de la saison des pluies, ramenaient le profil hydrique sur un mètre de sol à des valeurs voisines de ce qu'il était en Mai à la fin d'une saison sèche absolue de 6 mois (HADDAD et SEGUY, 1972). La probabilité de voir survenir à Bouaké (Côte d'Ivoire) des périodes sèches inopportunes de plus de 12 jours consécutifs est d'environ 30 % en Mai, Juillet et Août, mois les plus sujets à ce genre d'aléas climatiques (I.R.A.T., 1973).

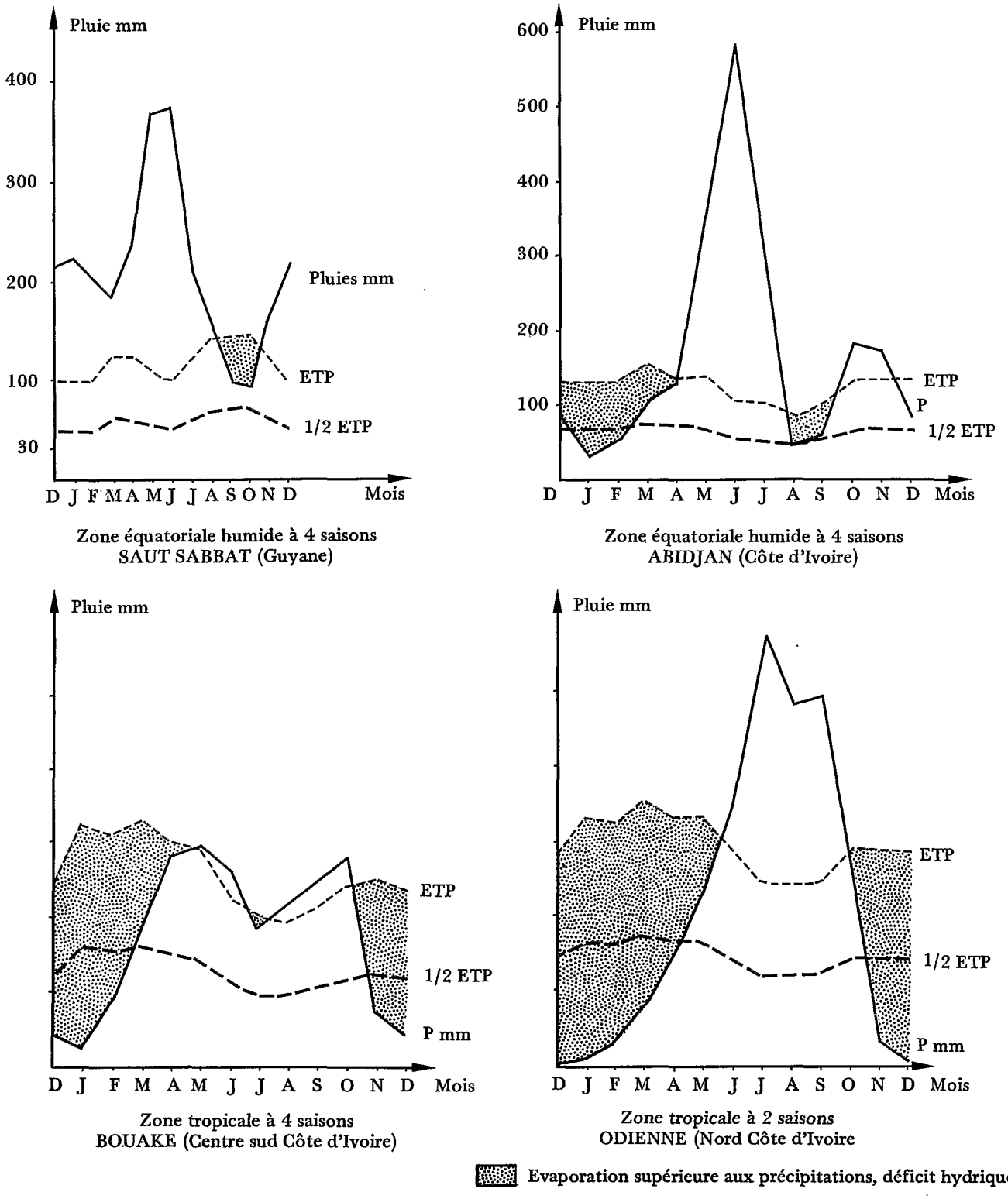
Or l'Afrique Occidentale et Centrale est relativement favorisée à ce point de vue ; mais que dire du Nord-est du Brésil où de tels « accidents » sont fréquents sinon habituels ; l'Afrique Orientale (Kenya, Tanzanie) a un régime de précipitations de saison pluvieuse un peu moins aberrant mais encore relativement irrégulier.

Même si l'on exclut ces cas extrêmes, on voit que les réserves en eau du sol ont une importance primordiale pour l'approvisionnement régulier des plantes dans une grande partie du domaine des sols ferrallitiques.

4.2. LA PERMEABILITE

L'infiltration de l'eau dans le sol est conditionnée par la perméabilité.

Figure 7
Présentation et évapotranspiration potentielle



La perméabilité d'un milieu poreux, donc d'un sol, se détermine très généralement par la formule de Darcy

$$Q = K\,S\frac{H}{I}$$

où Q est le débit, S la surface du milieu poreux, H la charge d'eau, I celle de l'échantillon et K un coefficient appelé coefficient de Darcy qui a les dimensions d'une vitesse (vitesse de filtration). Les méthodes les plus utilisées (1) pour les sols ferrallitiques sont :

— *la méthode de Hénin* (HENIN et MONNIER, 1958), méthode de laboratoire qui s'applique à des échantillons tamisés à deux millimètres.

— *la méthode Vergière* (BOURRIER, 1965), également méthode de laboratoire, mais qui utilise des échantillons volumineux, non perturbés.

— *la méthode des cyclindres de Müntz* (MUNTZ, 1907), méthode de terrain qui donne des résultats globaux valables surtout en surface. S'applique aux sols saturés d'eau.

— *la méthode Porchet*, méthode de terrain (citée par COLOMBANI et *al.*, 1972).

— *la méthode Pioget* utilisable en sol non saturé d'eau (PIOGET, 1944).

Si en sol homogène, sans cailloux ni gravillons, les deux premières méthodes sont à peu près équivalentes (TALINEAU, 1969), par contre dès que l'homogénéité du sol est perturbée par un accident quelconque, il faut utiliser les méthodes Vergière et Muntz ainsi que la méthode Porchet, cette dernière étant la moins employée (2).

Les sols ferrallitiques ont généralement des perméabilités élevées ainsi qu'on peut le constater sur le tableau suivant (tableau V.4.), à tel point que des coefficients K de Darcy inférieurs à 2-4 cm/h sont relativement rares.

L'échelle de perméabilité suivante, assez communément admise, classe la plupart des sols ferrallitiques du tableau VI.4. parmi les sols perméables et très perméables.

$K < 0{,}40$ cm/heure	sol imperméable
$0{,}4 < K < 1{,}8$ cm/heure	sol peu perméable
$1{,}8 < K < 18$ cm/heure	sol perméable
$K > 18$ cm/heure	sol très perméable

Parmi les facteurs qui déterminent le perméabilité d'un sol, il y a bien évidemment en premier lieu la porosité ; il faut toutefois distinguer entre la pénétration rapide de l'eau sous faible tension dans les macropores et une pénétration lente sous forte tension dans les micropores, observation valable pour tous les types de sol, y compris les ferrallitiques (AUDRY, 1967 ; FEODOROFF, 1965 ; POURRUT, 1968 ; ROOSE, 1970). On retiendra surtout ici l'importance de la macroporosité, la microporosité restant constante pour une texture donnée : ainsi des sols ferrallitiques moyennement désaturés de Grimari (République Centrafricaine) subirent une diminution de perméabilité allant de 50 à 80 mm/h sous savane à 5 mm/h (parfois) après huit ans de culture, diminution qu'on peut relier à une baisse de la macroporosité de 16 à 12 % en volume alors que la microporosité ne variait pratiquement pas (MOREL et QUANTIN, 1972).

La structure joue également un rôle : les sols classés à bonne structure en République Centrafricaine ont des vitesses de filtration (K de Darcy) supérieures à 110-120 mm/heure, alors que la plus grande partie de ceux considérés comme structuralement dégradés ont

---

(1) On consultera avantageusement à ce sujet l'ouvrage d'AUDRY et *al.* (1973) « Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Méthodologie. Techniques. Limitations actuelles. Quelques voies de recherches », ORSTOM, Bulletin n° 2 du groupe de dynamique actuelle, 110 p. (miméo).

(2) Des expériences en cours en Côte d'Ivoire (ASSELINE et VALENTIN, 1977) montrent des distorsions considérables entre les intensités minimales d'infiltration mesurées d'une part par les méthodes Müntz et Pioget et d'autre part par le simulateur de pluie Swanson. La charge d'eau dans le premier cas provoque des intensités d'infiltration très supérieures à ce qui est observé sous pluie naturelle ou artificielle.

TABLEAU VI.4. — *Quelques valeurs de la perméabilité des sols ferrallitiques*

	Sol	Profondeur en cm	Végétation	Perméabilité K cm/h	Méthode utilisée	Référence Auteurs
Côte d'Ivoire (Korhogō)	Sableux à gravillons en surface	Surface	Couverture arborée	90	Muntz	CAMUS et BERTHAULT (1972)
	Argileux en profondeur	Surface	Savane herbacée dense	43 à 90	Muntz	"
		Surface	Savane herbacée claire	14 à 43	Muntz	"
		Surface	Sol nu	14	Muntz	"
Côte d'Ivoire (Abidjan)	Sableux à sablo-argileux en surface	20-35	Prairie à Panicum maximum	38,5	Vergière	TALINEAU (1969)
	Sablo-argileux en profondeur	35-55	—	29,8	"	"
		55-90	—	30,6	"	"
		90-165	—	32,0	"	"
Sénégal (casamance)	Sableux à sablo-argileux en surface	Surface	Forêt sèche	2,0 à 4	Hénin	CHARREAU et FAUCK (1960)
	Argilo-sableux en profondeur		Après 6 ans de culture	1,7 à 2,0	Hénin	"
RCA Grimari	Sablo-argileux en surface	0-15	Jachère à impérata	5	Muntz	MOREL et QUANTIN (1972)
	Sablo-argileux en profondeur	0-15	Après labour	15	Muntz	
Ouango	Sablo-argileux en surface	0-15	Savane à graminées	35,0	Hénin	BOYER et COMBEAU (1960)
Gambo	Sableux en surface	0-15	Savane à impérata	9,1	Hénin	"
	Sablo-argileux en profondeur					
Gounouman	Sablo-argileux en surface	0-15	Savane à impérata	13,8	Hénin	"
	Sablo-argileux en profondeur					
Malaisie	Argileux	0-5	Hévéa et plante couverture herbacée	29,0		RRIM, 1974
		15-30		23,6 à 25,9		

des vitesses de filtration nettement inférieures à 100 mm/heure (BOYER et COMBEAU, 1960). La corrélation perméabilité-stabilité structurale n'est toutefois pas aussi nette qu'entre perméabilité et porosité.

Les amendements calciques, même n'ayant aucun effet sur la stabilité structurale, pourraient, au moins dans certains cas, provoquer une diminution de l'indice de percolation K des sols ; c'est là le résultat inattendu, mais confirmé d'année en année, d'expériences de chaulage (par la chaux agricole) menées sur les sols fortement désaturés sablo-argileux issus des sables tertiaires de basse Côte d'Ivoire (GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL, 1976).

Il ne semble pas que la texture ait une grande importance, le tableau VI.4. montrant que des sols de textures voisines peuvent avoir des perméabilités fort différentes. Notons toutefois que les sols sableux, s'ils ont beaucoup de sables fins, sont les moins perméables sans doute parce que leurs agrégats sont peu stables et que leurs débris colmatent les pores (par contre les sols à sables moyens et grossiers se classent souvent parmi les plus perméables).

La végétation joue un très grand rôle en favorisant une meilleure pénétration de l'eau le long des racines et dans les vides qu'elles laissent après leur mort ; ce sont surtout les racines fasciculées des graminées qui paraissent actives, en particulier les bambous à Madagascar (DAMOUR et KILIAN, 1967), bien qu'on ait noté dans le nord de la Côte d'Ivoire une nette supériorité des reboisements en tecks et anacardiers sur les jachères à graminées selon CAMUS et BERTHAULT (1972). Ces deux derniers auteurs attribuent d'ailleurs une importance essentielle à la nature et à la densité de la végétation au point qu'ils considèrent comme tout à fait secondaires les caractéristiques propres au sol ; ils ont expérimenté, il est vrai, sur trois unités de sol très proches les unes des autres, de telle sorte qu'il serait imprudent de transposer leurs conclusions en d'autres lieux et à d'autres types de sol.

La perméabilité n'est pas constante

Tout d'abord elle varie de façon naturelle tout au long de l'année, minimum au cœur de la saison des pluies, maximum en fin de saison sèche (BOUCHARD, 1967 ; TALINEAU, 1969), l'amplitude des variations étant de 50 % en moyenne par rapport aux valeurs maximales (figure 8), soit un cycle tout à fait comparable à celui de la structure (cf. chapitre IV., p. 38).

Des pluies continues pénétrant dans un sol peuvent entraîner une diminution de la perméabilité par détérioration des parois des grands pores et affaiblissement progressif des qualités structurales ; expérimentalement la mise en œuvre de la méthode Vergière pendant trois heures dans les sols ferrallitiques fortement désaturés sur sables tertiaires de Côte d'Ivoire a provoqué une diminution de la vitesse de filtration (K de Darcy) de 11 % dans l'horizon humifère et de 25 à 35 % dans les horizons profonds par rapport aux chiffres obtenus au bout d'une heure de percolation (TALINEAU, op. cit.). A cette diminution s'ajoute, en sol nu, celle brutale due à l'impact des gouttes d'eau (destruction des agrégats puis colmatage des pores et lissage ultérieur en surface).

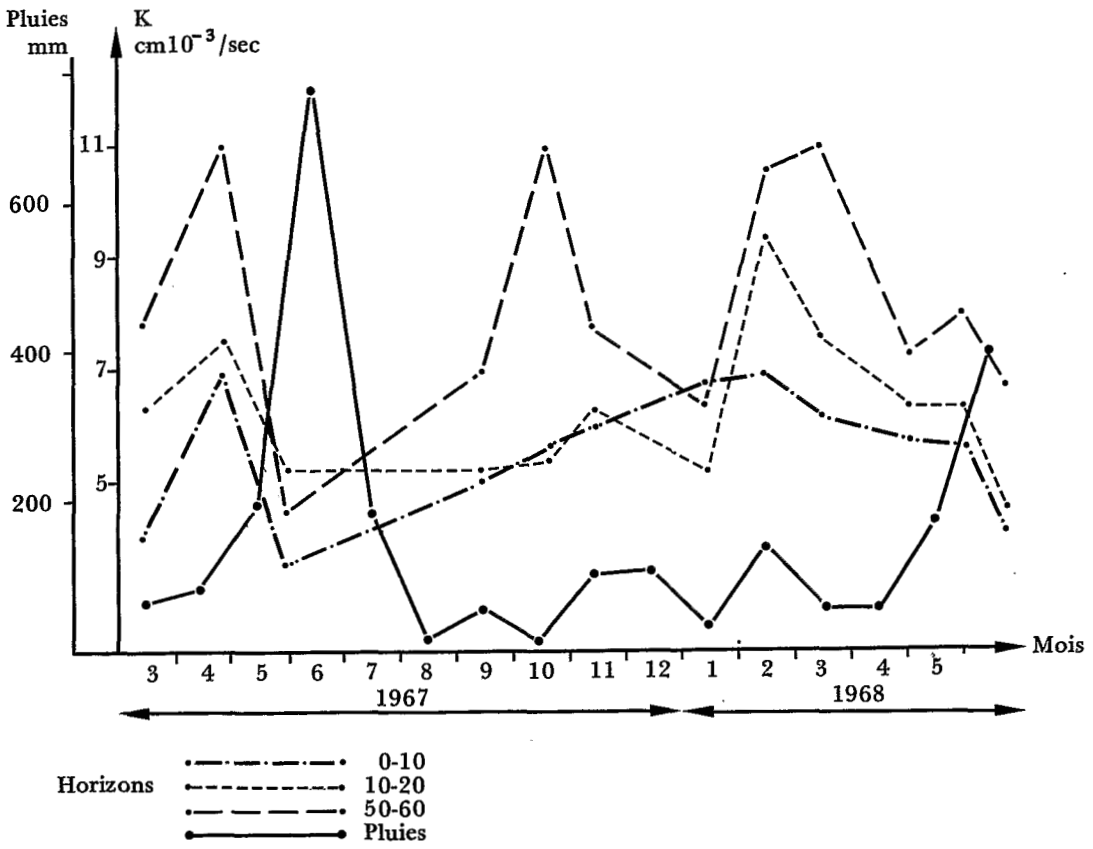
La perméabilité varie en fonction des façons culturales

Comme pour la porosité, on peut distinguer deux types de variations :

— une diminution à long terme en fonction du temps : MOREL et QUANTIN (1972) indiquent qu'à Grimari (République Centrafricaine) la perméabilité d'un sol après huit années de culture peut descendre au dixième de sa valeur avant défrichement, surtout lorsque le sol se « glace » en surface ; LAL (1976-e) constate qu'en 3 ans, la perméabilité d'un sol d'Ibadan (Nigéria) passe de 3,5 cm/h à 0,1-0,2 cm/h qu'il s'agisse de jachère nue ou de culture de maïs avec labour.

Figure 8

Variations saisonnières de la vitesse de filtration dans un sol (K déterminé par la méthode Vergière) Basse Côte d'Ivoire - Abidjan - Adiopodoumé d'après TALINEAU, *1969*



— une augmentation à court terme par les façons culturales bien évidemment liée à l'augmentation momentanée de porosité qu'elles provoquent.

CHAUVEL et PEDRO (1978) attribuent la diminution (inéluctable à long terme) de la perméabilité des sols cultivés à une sorte d'« effondrement plasmique » au cours de la saison sèche, lorsque celle-ci est suffisamment longue et intense comme en Casamance. Il y a alors évacuation de l'eau des crypto-vides, d'où un ré-arrangement du plasma du sol dans le sens d'un compactage qui se propage de proche en proche dès que le sol n'est plus protégé par la végétation.

Toutefois, on peut se demander dans quelle mesure cette explication est valable pour les sols situés sous des climats plus humides que la Casamance.

4.3. LE DRAINAGE

L'eau apportée par les précipitations lors d'une « période humide » ne peut, dans les climats où se développent habituellement les sols ferrallitiques, être entièrement stockée par le sol ; le surplus est évacué par drainage.

L'indice de drainage (calculé) d'Hénin et Aubert et le drainage maximum possible

HENIN et TERNISIEN (1944), AUBERT et HENIN (1945) ont proposé un indice de drainage (en principe valable pour tous les sols du monde) défini par la formule suivante :

$$D = \frac{\gamma p^3}{1 + \gamma p^2} \qquad \text{avec } \gamma = \frac{b}{0{,}15\ T - 0{,}13}$$

où D est le drainage calculé en mètre
P est la pluviosité annuelle moyenne en mètre
T est la température moyenne annuelle en degré centigrade
b est un coefficient de texture qui peut varier de 0,5 (argile) à 2 (sable grossier).

On a comparé sur le tableau VI.5., pour les quatre stations citées en référence, le drainage calculé Hénin-Aubert (en prenant arbitrairement b = 1) et la différence pluviométrie (P) et évapotranspiration potentielle des mois où P est supérieure à l'ETP (« période humide »). Cette dernière valeur correspond évidemment au drainage maximum théoriquement possible, en admettant que le ruissellement est négligeable.

TABLEAU VI.5.

	Pluviosité totale annuelle	Drainage Hénin-Aubert	Drainage théorique P-ETP (mois où P >ETP)
	mm	mm	mm
Saut Sabbat (Guyane)	2 563	1 620	1 230
Abidjan (Côte d'Ivoire)	2 040	1 070	713
Bouaké (Côte d'Ivoire)	1 200	330	159
Odienné (Côte d'Ivoire)	1 630	661	335

Cet indice donne donc des chiffres apparemment un peu élevés en climat tropical ; il peut être utile pour indiquer un ordre de grandeur approché en l'absence de données sur l'évapotranspiration potentielle.

Le drainage potentiel calculé de COCHEME et FRANQUIN (1967)

En faisant le bilan hydrique des mois les plus pluvieux et en le comparant avec la capacité de stockage du sol, dite R.U., fixée arbitrairement à 100 mm, COCHEME et FRANQUIN (op. cit.) ont calculé les drainages dans diverses stations de l'Afrique de l'Ouest dont on trouvera sur le tableau VI.6. ceux qui concernent la zone des sols ferrallitiques.

TABLEAU VI.6. — *Comparaison de la pluviosité et du drainage calculé pour la zone des sols ferrallitiques de l'Afrique de l'Ouest d'après COCHEME et FRANQUIN (1967)*

Localisation	Pluviosité en mm	Drainage calculé en mm
Dabou (Côte d'Ivoire)	2 298	1 420
Abidjan (Côte d'Ivoire)	2 087	1 171
Cotonou (Bénin)	1 305	374
Bouaké (Côte d'Ivoire)	1 221	105
Odienné (Côte d'Ivoire)	1 662	612
Ina (Bénin)	1 373	504
Sokodé (Togo)	1 399	444
Ferkessedougou (Côte d'Ivoire)	1 346	370

Le drainage calculé « in situ »

Le drainage peut être calculé par l'équation suivante :

Drainage = Pluie — (ETR + ruissellement ± variations du stock d'eau du sol).

L'évapotranspiration réelle (ETR) est rarement connue avec précision, mais en période humide on peut l'assimiler à l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Quant aux variations du stock d'eau dans le sol, on les mesure par échantillonnage à la tarière ou par la mise en œuvre d'un humidimètre à neutrons.

Lorsque le ruissellement est nul ou négligeable, cas général sous forêt ou sous cultures arbustives pérennes avec plantes de couverture, le drainage calculé correspond à :

520 à 570 mm au-delà de 1,90 m de profondeur pour une pluviosité de 1 748 mm dans un sol sableux en surface, argileux en profondeur sous forêt semi-décidue à Divo en moyenne Côte d'Ivoire (ROOSE, 1970)

374 mm au-delà de 2,30 m de profondeur pour une pluviosité de 1 449 mm dans un sol sablo-argileux sous forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire (HUTTEL, 1971).

Lorsque le sol est mis en culture et qu'il y a ruissellement, le drainage diminue d'autant : ainsi pour une pluviosité moyenne de 2 157 mm, on obtient dans les sols sablo-argileux de basse Côte d'Ivoire (ROOSE, 1973) les valeurs indiquées dans le tableau VI.7.

TABLEAU VI.7. — *Incidence du ruissellement sur le drainage d'après ROOSE (1973)*

	Drainage		Ruissellement en % de la pluie
	mm	% pluie	
Forêt	932	43,2	0,9
Prairie de Panicum	608	28,2	21,3
Sol nu	476	22,0	31,3

En fait, ce drainage est très limité dans le temps : 3 à 4 mois en basse Côte d'Ivoire (région pourtant réputée humide), un seul mois (juin) totalisant près de 30 % du drainage total annuel.

D'où une lixiviation intense : on a calculé que le sol sous forêt décidue de moyenne Côte d'Ivoire mentionné plus haut perdait par an sous l'effet du seul drainage vertical 151 kg/ha de CaO, 141 kg/ha de MgO, 311 Kg/ha de K2O, 121 Kg/ha de N, 158 Kg/ha de silice (SiO_2), le phosphore par contre est peu entraîné (3,8 Kg/ha de P_2O_5) ; si on ajoute les pertes dues au drainage oblique et au ruissellement, on n'augmente guère ces chiffres que de 1 % (ROOSE, 1970).

Une conséquence extrêmement grave pour l'agriculture des tropiques est l'entraînement des éléments fertilisants, et donc des engrais, en profondeur hors de portée des racines. Un seul exemple suffira a en montrer l'importance : 50 à 60 % des 530 Kg/ha/an d'engrais potassiques (exprimés en K_2O), 70 à 75 % des apports en dolomie (5,5 t/ha en début de cycle) sont enlevés dans une bananeraie de Côte d'Ivoire par drainage, ces résultats ayant été acquis sur trois ans (GODEFROY, MULLER, ROOSE, 1970). Cet inconvénient existe même dans les climats à longue saison sèche, type Odienné, en raison de la concentration de la pluviosité sur quelques mois.

Mesure de drainage « in situ »

Si l'expérimentation sur monolithes volumineux de sol s'est peu développée pour mesurer le drainage des sols ferrallitiques, par contre on a assez largement utilisé les cases lysimétriques où le sol est soigneusement reconstitué.

Grâce à cette dernière méthode, on a montré qu'après avoir reçu 800 millimètres de pluie, les sols argileux de l'état de Sao-Paulo (Brésil) laissent percoler, au-dessous de 45 cm, 16 % de l'eau reçue et les sols sableux 35 % (KUPPER et *al.*, 1963).

Une autre expérience faite sur des cases plus profondes (1 m) dans la vallée du Niari (Congo) a mis en relief la diminution du drainage due à l'évaporation par les plantes : sur 360 mm de pluie, le sol couvert d'hibiscus, plante à croissance rapide et à végétation abondante, a perdu 48 mm, tandis qu'il laissait échapper 298 mm sous arachide et 474 mm, soit plus des trois quarts de la pluie, s'il était nu (FRANQUIN et MARTIN, 1962).

On peut reprocher aux cases lysimétriques de perturber profondément la macrostructure des sols ; aussi a-t-on utilisé en Côte d'Ivoire des casiers drainants (entonnoir placé à une certaine profondeur) ou encore des cylindres métalliques de 60 à 90 cm de diamètre enserrant un monolithe de sol (ROOSE et HENRY des TUREAUX, 1970).

4.4. BILAN HYDRIQUE DES SOLS

Le bilan hydrique résume les diverses destinées de l'eau dans le sol. On peut partir de la formule :

Pluies = ETR + Drainage + ruissellement ± variation du stock d'eau du sol.

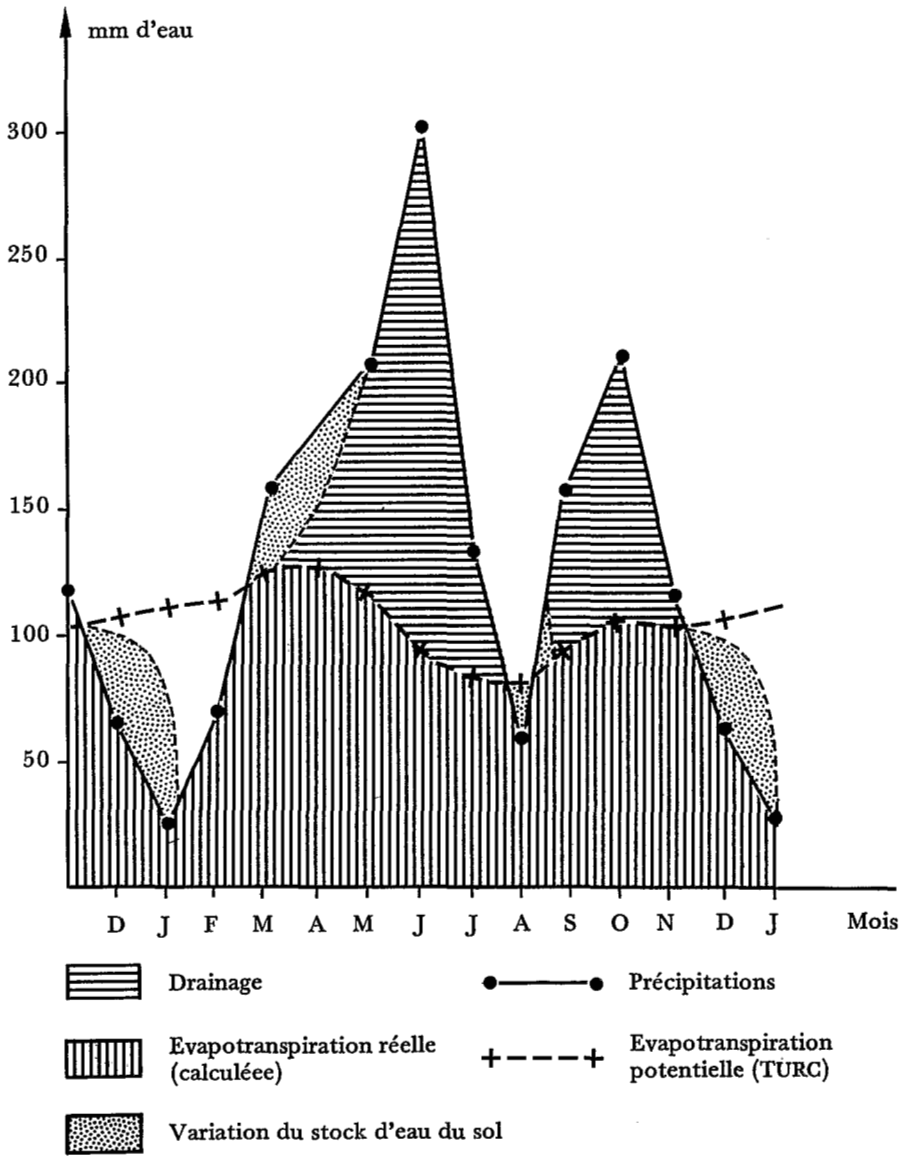
L'évapotranspiration réelle (ETR) est pratiquement égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP) en saison humide et on peut considérer en première approximation qu'elle ne dépasse pas la pluviosité en saison sèche.

Le drainage est généralement un drainage calculé rectifié par les variations du stock d'eau du sol.

Le ruissellement est très faible dès que le sol est couvert ; n'importe quelle couverture dense suffit, même 2 cm de paillis (FOURNIER, 1967 ; ROOSE, 1967). La pente n'intervient sur le ruissellement que lorsque le sol est nu ou partiellement dénudé, mais ne le fait plus guère augmenter à partir d'un certain degré de pente (5 % en basse Côte d'Ivoire

Figure 9

Schéma du bilan hydrique
d'une parcelle sous forêt dense semi décidue en Moyenne Côte d'Ivoire
Sols ferrallitiques faiblement désaturés remaniés modaux
d'après ROOSE, *1970*



d'après ROOSE, 1970). Un fort ruissellement diminue les quantités d'eau drainées et évapotranspirées.

On trouvera ici deux exemples de bilans hydriques, tous les deux provenant de la Côte d'Ivoire.

— *Bilan hydrique de Divo — Moyenne Côte d'Ivoire* — (ROOSE, 1970) figure 9. Sol ferrallitique faiblement désaturé remanié, modal, sableux, en surface, nettement argileux en profondeur, sous couvert de forêt dense semi-décidue.

La pluviosité est en moyenne de 1 748 mm par an.

L'ETR brute calculée est de 63 % et le drainage brut de 36 % des précipitations. Les variations du stock d'eau du sol sont de 100 à 150 mm, d'où des ETP et drainage rectifiés respectivement de 70 % et 30 % environ de la pluie.

— *Bilan hydrique à Adiopodoumé — Basse Côte d'Ivoire* — (ROOSE, 1973) sur sol ferrallitique fortement désaturé appauvri modal sableux à sablo-argileux en surface (13 % d'argile), sablo-argileux en profondeur.

On trouvera sous forme de tableau (tableau VI.8.) la comparaison entre bilans hydriques calculés sur sol nu, sur sol cultivé (prairie) et sur sol couvert de forêt ; on se rend compte que la disparition de la forêt en augmentant le ruissellement fait diminuer parallèlement les quantités d'eau drainées.

TABLEAU VI.8. — *Bilan hydrique à Adiopodoumé d'après ROOSE (1973)*

	Pluie mm	ETR rectifié		Drainage rectifié		Ruissellement % pluie	Variations stock d'eau du sol
		% pluie	mm	% pluie	mm		
Forêt	2 157,6	55,9	1 206,2	43,2	932	0,9	200 mm
Culture (prairie à *Panicum*)	2 157,6	50,5	1 089,6	28,2	608	21,3	120 mm
Sol nu	2 157,6	46,7	1 007,6	22,0	476	31,3	96,3 mm

5. LE DRAINAGE OBLIQUE

Dans tout ce qui précède, on a envisagé le schéma classique de l'eau de pluie qui pénètre dans le sol, emplit les pores disponibles, tandis que l'excès s'enfonce verticalement et va rejoindre la nappe phréatique. De fait, dans le cas général, la circulation oblique de l'eau ne représente qu'une très faible partie du drainage total, comme il ressort des études effectuées en Côte d'Ivoire pour la caractériser (ROOSE, 1970 a et b).

Faisant contrepoint, on a mis récemment en évidence en Guyane Française (BLANCANEAUX, 1977 ; BOULET, 1978 ; HUMBEL, 1978 ; BOULET, BRUGIERE et HUMBEL, 1979) des sols ferrallitiques où la dynamique de l'eau est superficielle : l'infiltration verticale se trouve bloquée à faible profondeur (vers 40 à 60 cm), à tel point qu'il se forme une nappe superficielle perchée à écoulement latéral ; ceci est évidemment dû au fait que les horizons sous-jacents restent imperméables à l'eau... et aussi aux racines (qui pourraient les ameublir si elles y pénétraient). Il s'agit là d'un cas extrême, dont, jusqu'à présent, on n'a pas

trouvé d'équivalent ailleurs qu'en Guyane française. Pour être complet, il faut aussi noter que ces sols à dynamique superficielle voisinent, en Guyane même, avec des sols à dynamique verticale de l'eau.

Il semble probable que les dynamiques superficielles de l'eau, sous la forme atténuée d'un drainage oblique partiel (même s'il est parfois important en volume), ne sont probablement pas aussi exceptionnelles que pourrait le faire croire ce qui précède.

En effet, la station de recherche sur le cacaoyer d'Itabuna (Etat de Bahia - Brésil) a mis en place un dispositif destiné à étudier en particulier érosion, drainage oblique et drainage vertical sur des versants de collines cultivés en cacaoyers (pente 15 %). Il s'agit ici d'un sol ferrallitique faiblement à moyennement désaturé, rajeuni, de couleur rouge-orangée (classé localement comme Alfisol), bien représentatif des sols des cacaoyères des environs. Fin 1979, les mesures systématiques n'avaient pas encore commencé, mais on estimait que sur les 70 mm d'une pluie tombant sur un sol déjà quelque peu humide, un tiers ruisselait en surface, un tiers s'écoulait obliquement à faible profondeur, tandis que le dernier tiers s'infiltrait à l'intérieur des horizons profonds du sol (LEITE, com. pers.). Une différence essentielle avec les sols guyanais, qui sont, eux, à dynamique totalement superficielle, provient du fait qu'ici l'horizon profond — au-dessus duquel se fait le drainage oblique — s'humidifie lentement mais s'humidifie quand même, et qu'il laisse passer le pivot des cacaoyers.

Le phénomène décrit ici ne relève probablement pas d'un « déséquilibre tectonique » selon l'interprétation donnée pour la Guyane (BOULET, 1978) et, en tout état de cause, ne présente aucun caractère extrême de gravité ; il n'empêche aucunement la mise en valeur, puisque ces sols portent des cacaoyers depuis de nombreuses années. Mais il montre que pédologues et agronomes doivent en tenir compte, en particulier pour estimer les risques d'érosion. La grande difficulté consiste évidemment à les reconnaître lors de l'examen des profils.

6. PRATIQUES AGRONOMIQUES D'ECONOMIE DE L'EAU

L'agriculteur a deux préoccupations : réduire au maximum l'évaporation propre du sol et diminuer le plus possible le drainage pour éviter autant que faire se peut la lixiviation des éléments fertilisants.

Le paillage se révèle comme un des meilleurs procédés de conservation de l'humidité dans le sol en période sèche, en particulier pour les plantes pérennes comme le caféier (FORESTIER, 1959) ; la réhumectation se fait sans difficulté dans les climats où sont habituellement situés les sols ferrallitiques. Le paillage est malheureusement coûteux à établir et entretenir.

En période humide le paillage, s'il est récent, présente le défaut de favoriser le drainage ; l'inconvénient est minime lorsque les cultures sont bien développées avec un feuillage abondant ; par contre, un paillage, même naturel, formé par les plantes spontanées ou cultivées arrivées à maturité, entraîne un drainage considérable dans la vallée du Niari en fin de saison des pluies, période qui coïncide précisément avec les précipitations les plus intenses (FRANQUIN et MARTIN, 1962).

Par contre au Dahomey, sous un climat bien différent, on profite du supplément d'eau en période pluvieuse pour faire une culture de maïs dans les plantations d'*Elaeïs guineensis* ; le maïs murissant à la fin de la saison des pluies, ses tiges desséchées forment un paillage très utile aux palmiers dès qu'arrive la saison sèche.

Il n'est pas douteux que les *plantes pérennes intercalées dans les cultures* entrent en concurrence pour l'eau avec ces dernières ; les cacaoyers de l'état de Bahia (Brésil) situés immédiatement sous les Erythrines, arbres utilisés comme ombrage, produisent 30 % de plus que ceux distants en moyenne de huit mètres qui se trouvent alors dans la zone de forte concentration des radicelles absorbantes de l'Erythrine ; la différence de productivité n'est pas uniquement due à un meilleur bilan hydrique, mais celui-ci y contribue certainement (CADIMA-ZEVALLOS, 1966).

Pour cette raison de concurrence, on fauche ou on recèpe en début de saison sèche les *plantes de couverture*. Ou encore l'on préconise l'emploi d'espèces dont les racines explorent une tranche de sol différente de celle où la plante développe ses racines. On utilisera par exemple pour le caféier, plante à enracinement en majorité superficiel, *Flemingia, Leucaena glauca, Mimosa invisa*, espèces à pivot s'enfonçant profondément dans le sol.

En ce qui concerne les cultures annuelles, les semis précoces et un développement rapide et vigoureux des plantes (grâce à la fumure si possible) évitent au maximum le drainage, tout en freinant le ruissellement, d'où une meilleure alimentation du sol en eau, précieuse lorsque les pluies sont irrégulièrement réparties.

Enfin on peut noter que le piétinement d'une forte charge en bovins sur les pâturages installés sur les « Catalina clays » de Puerto-Rico (sol ferrallitique humifère) a eu pour effet de doubler la capacité en eau utile des 7,5 centimètres supérieurs par réduction de la porosité pour l'air au profit de la porosité pour l'eau (VAN WAMBECKE, 1974). Il est dommage que des études semblables n'aient pas été systématiquement faites en Afrique francophone où on considère souvent avec suspicion l'introduction du bétail dans les jachères herbacées.

7. LIMITATIONS AGRICOLES DUES A UN DRAINAGE INSUFFISANT

On a vu précédemment (chapitre 2, p. 13-15) qu'un drainage insuffisant peut correspondre à une limitation en profondeur des horizons accessibles aux racines et même, dans le cas extrême des sols de Guyane à dynamique superficielle de l'eau, à une impossibilité pratique de mise en valeur agricole (BOULET, 1978 ; HUMBEL, 1978).

Pendant longtemps, les prospecteurs ont cru que l'examen des taches de gley et de pseudo-gley dans le profil suffisait pour caractériser le drainage d'un sol. L'exemple de Guyane est venu à point nommé pour montrer, de façon caricaturale si l'on ose dire, qu'un sol pouvait avoir un régime habituel d'engorgement temporaire par l'eau de pluie, tout en montrant un profil dépourvu de signes visibles d'hydromorphie.

On savait déjà que des pluies un peu fortes et un peu prolongées peuvent provoquer l'asphyxie au moins partielle des racines, tout simplement parce que l'excès d'eau ne s'évacue pas assez vite. Et cela peut se produire dans tous les sols argileux, y compris ferrallitiques, si leur macroporosité est un peu insuffisante par rapport à l'intensité des pluies. Il s'agit là d'une hydromorphie discrète, à peu près impossible à déceler par le simple examen du profil.

C'est pour cette raison que l'on déconseille les sols argileux pour un certain nombre de cultures sensibles à l'asphyxie des racines : il s'agira surtout de l'ananas et de l'hévéa, mais aussi du caféier, du cacaoyer, des citrus et du théier (ici pour la valeur commerciale du thé produit). Le palmier à huile, légèrement plus tolérant, craint malgré tout un excès d'eau temporaire qui provoque chez lui la maladie du dessèchement des feuilles (IRHO, 1973). Le bananier et la canne à sucre montrent à cet égard une sensibilité nettement

moindre que les espèces ci-dessus, mais, malgré tout, supportent mal des conditions d'engorgement du sol jusqu'en surface pendant quelques mois consécutifs.

En ce domaine, la difficulté réside d'une part à déterminer les seuils de tolérance propres à chaque plante (généralement connus de façon empirique), et d'autre part à caractériser l'état d'aération du sol, au moins pendant les mois les plus humides. C'est une donnée de plus en plus prise en considération (SYS, 1978). L'idéal est évidemment de la caractériser par une mesure précise.

C'est ainsi qu'au Surinam, on s'est efforcé d'évaluer, dans le cas de plantations de palmiers à huile, le nombre de jours ou de semaines où existent dans le sol des conditions réductrices, ces conditions réductrices étant définies par un potentiel Red-Ox (Eh) inférieur à 200 mV (FAO, 1976). D'où le tableau VI.9. indiquant les limitations dues à ce facteur pour le palmier à huile. Faute de pouvoir mesurer Eh dans chaque cas, on cherche à estimer les périodes d'engorgement par sondages à la tarière ou tout autre moyen adéquat.

TABLEAU VI.9. — *Limitations dues à l'engorgement des cinquante centimètres supérieurs du sol établies pour le palmier à huile au Surinam d'après F.A.O. (1976)*

Limitations	Période continue avec Eh > 200 mV, en semaines	Période continue de saturation par l'eau. Estimation en semaines	Aspect du profil	Végétation naturelle
Nulle à faible	< 1 à faible	< 3	Bien drainé à modérément drainé	Forêt ombrophile
Moyenne	1 à 3	3 à 4	Médiocrement drainé	Idem
Forte	2 à 4	4 à 6	Mal drainé	Forêt hygrophile
Très forte	4 à 8	6 à 10	Idem	Idem
Extrême	> 8	> 10	Très mal drainé	Marécage

Evidemment, ces limitations ne concernent pas spécialement un type particulier de sol. En fait, les sols ferrallitiques possèdent très généralement une bonne perméabilité, d'où, dans la plupart des cas, un drainage convenable ; mais on peut toujours craindre de « tomber » sur une exception. D'où l'intérêt, après examen du profil, de la mesure du Eh en période pluvieuse dans les zones douteuses, avant l'investissement considérable que représente l'établissement de plantations pérennes.

8. CONCLUSION

Les sols ferrallitiques ont en général des propriétés hydriques satisfaisantes :

Domaine d'eau utile en moyenne de 10 à 14 mm par tranche de sol de 10 cm d'épaisseur qui permet de compenser sensiblement les aléas climatiques.

Perméabilité habituellement élevée au moins sous végétation naturelle assurant une bonne pénétration de l'eau.

Par contre, les conditions climatiques sous lesquelles se développent la majorité de ces sols (forte pluviosité, concentration maximum des précipitations sur une courte période) font que le drainage est intense et entraîne de ce fait une importante lixiviation des éléments fertilisants.

Comme cela se produit pour la structure, la mise en culture provoque une certaine détérioration de la perméabilité qui reste habituellement acceptable ; ce n'est que lorsqu'une croûte superficielle se forme sur le sol qu'un ruissellement intense se produit ; il peut compromettre dans une certaine mesure l'approvisionnement en eau du sol.

On peut considérer qu'en conditions normales, qu'il s'agisse de sol couvert de végétation naturelle ou de sol cultivé, le bilan hydrique est favorable aux plantes adaptées aux climats assez divers dans lesquels se situent les sols ferrallitiques.

origine des éléments nécessaires aux plantes

Dans une perspective agricole, on peut considérer qu'il existe trois origines distinctes pour les éléments chimiques du sol nécessaires aux plantes : la roche-mère, les débris végétaux, et en particulier les cendres provenant de leur incinération et, enfin, l'atmosphère.

1. LA ROCHE-MÈRE

C'est le fournisseur originel des cations majeurs, calcium, magnésium, postassium et sodium, ainsi que du phosphore et des oligo-éléments ; certains éléments comme le fer, la silice et l'aluminium, oligo-éléments pour la plante, se trouvent toujours dans le sol en quantités telles que les carences chez le végétal, si elles existent, ne proviennent pas d'une déficience dans le sol (1). Il n'en sera donc pas question ici.

Le but de ce paragraphe est de montrer dans quelle mesure les phénomènes de ferrallitisation interviennent dans cette fourniture d'éléments minéraux par la roche-mère au sol.

1.1. TENEURS DES SOLS EN NUTRIMENTS ET RICHESSE DE LA ROCHE-MERE EN CES ELEMENTS

Le sol étant fils d'un matériau originel, il est logique de penser qu'il héritera, au moins en partie, la richesse chimique de sa roche-mère ; ainsi, les sols dits à cacaoyers, considérés comme les mieux pourvus en bases, dérivent le plus souvent de roches basiques : gneiss à amphibole, diorite, gabbros, tandis qu'un grès purement quartzitique donne naissance à des sols habituellement fort pauvres.

Prospecteurs et pédologues connaissent bien cette particularité : ainsi DABIN et LENEUF 1956) ont constaté que les sols de plateau de la région de Duékoué dans l'ouest de la Côte d'Ivoire (pluviométrie 1 700 m) n'ont, entre eux, aucune différence texturale ou structu-

(1) Il faut faire une exception pour les sols dits « allitiques » composés presqu'exclusivement d'hydroxydes de fer et d'alumine ; des carences en silice peuvent s'y produire, causées par l'absence de silicium même combiné. L'extension géographique de ces sols est relativement faible.

rale notable, mais présentent, par contre, des variations importantes dans les teneurs en bases échangeables selon la nature de leur roche-mère (Tableau VII.1).

TABLEAU VII.1. — *Teneurs en cations échangeables de deux sols ferrallitiques de l'ouest de la Côte d'Ivoire, à profils identiques mais issus de roche-mères différentes d'après* DABIN *et* LENEUF *(1956)*

	Sol sur granite à biotite et à amphibole		Sol sur granite à muscovite	
Prof. cm	0-10	100	0-10	100
Ca mé/100 g.	8,10	1,85	1,10	0,55
Mg mé/100 g	1,68	0,60	0,14	0,06
K mé/100 g	0,33	0,17	0,05	0,01
Na mé/100 g.	0,17	0,13	0,06	0,05
S B E mé/100 g. . . .	10,28	2,05	1,35	0,67

A Java, MIDDELBURG (1955) peut relier les teneurs en potassium échangeable des sols à la nature des roches-mères (volcanique, plutonique, sédimentaire), au moins tant que le sol est relativement jeune.

Au Brésil, dans l'état de Bahia, les sols de la série Producão de la région d'Itabuna dérivés de diorite migmatisée (FERRERA et OLIVEIRA, 1970) sont cultivés en cacaoyers depuis près d'un siècle sans baisse de production malgré l'absence d'engrais, alors que les sols voisins formés sur des sédiments ou pédiments quaternaires fort mal pourvus en éléments minéraux ne peuvent guère être utilisés que comme pâturages extensifs.

Il serait possible de multiplier à l'infini de tels exemples.

1.2. DEVENIR DES NUTRIMENTS MINERAUX AU COURS DE LA PEDOGENESE FERRALLITIQUE

La pédogenèse ferrallitique est, en elle-même, un facteur très défavorable à la permanence des éléments chimiques provenant de la roche-mère jusque dans le sol qui en est issu. LENEUF (1959) indique les pertes en éléments pour une ferrallitisation théorique complète d'un granite calco-alcalin de Côte d'Ivoire (Tableau VII.2.).

TABLEAU VII.2. — *Pertes en éléments lors de la ferrallitisation d'après* LENEUF *(1959)*

Teneur de la roche fraîche densité 1,26 %		Perte en éléments pour une ferrallitisation théorique complète de la roche Kg/m3	
Ca 0	1,20	Ca	24,8
Mg 0	0,20	Mg	0,46
K_2 0	4,75	K	102,8
Na_2 0	4,24	Na	81,6

Ces pertes sont ici des pertes « potentielles » valables seulement s'il y a élimination totale de la silice des silicates des roches ; il s'agit donc d'une vue quelque peu théorique. Mais des pertes du même ordre de grandeur sont calculées par BONIFACE (1959) à propos de l'altération ferrallitique des dunites, dolérites et syénites néphéliniques de Guinée.

Etudiant le devenir du potassium dans les sols d'Indonésie, MIDDELBURG (1955) constate que l'on peut, dans une certaine mesure, relier la teneur en K du sol à celle de la roche-mère, mais il souligne qu'au fur et à mesure que le sol vieillit, il y a disparition plus ou moins complète du potassium.

Ce qui est valable pour le potassium l'est aussi pour d'autres éléments. Ainsi SIEFFERMANN (1973), étudiant cette fois l'ensemble des transformations qui, à partir d'un basalte du Cameroun, donnent naissance à un sol ferrallitique de neuf mètres de profondeur développé à 1 100 mètres d'altitude sous une pluviosité annuelle de 1 500 millimètres, sol actuellement couvert d'une savane herbacée, donne le tableau suivant (VII.3.) :

TABLEAU VII.3.* — *Teneur en éléments totaux de divers horizons d'un sol ferrallitique formé sur basalte au Cameroun d'après SIEFFERMANN (1973)*

Horizon	Prof. du prélèvement	P_2O_5 %	Mn_3O_4 %	Na_2O %	K_2O %	MgO %	CaO %
A (0-15 cm)	5	0,25	0,19	< 0,03	0,1	0,6	< 0,02
B_1 0x (15-60 cm)	25	0,20	0,16	< 0,03	0,05	0,5	< 0,02
B_2 0x (60-235 cm)	105	0,20	0,16	< 0,03	0,05	0,5	< 0,02
B_3 0x cn (235-255 cm)	240	0,20	0,16	< 0,03	0,05	0,5	< 0,02
B_4 0x (235-250 cm)	310	0,17	0,21	< 0,03	0,05	0,5	< 0,01
BC (350-470 cm)	360	0,25	0,22	< 0,03	0,05	0,7	< 0,01
CG (470-900 cm)	600	0,30	0,31	0,03	0,10	0,7	0,2
Roche-mère > 900 cm	950	0,50	0,20	1,6	1,2	15,2	8,65

* Analyses totales faites au quantomètre de l'Université de Strasbourg, sauf pour le phosphore.

La durée nécessaire à l'altération d'un mètre de basalte peut varier de 50 000 à 150 000 ans selon les conditions climatiques et les auteurs, ce qui implique une durée d'altération totale de 1 000 000 d'années environ pour engendrer le sol tel qu'il se présente actuellement.

Il est facile de constater, d'après ces chiffres, que la transformation d'une roche en sol (horizon B) entraîne une perte apparente d'éléments de 95 à 98 % pour les cations alcalins et alcalino-terreux, de 60 % pour le phosphore, tandis que les teneurs en manganèse sont plus stables (perte de 20 % approximativement).

Si l'on introduit une correction afin de rendre compte des différences de densités, 2,9 pour le basalte, 1,3 pour le sol (horizon B), on obtient des pertes réelles approximatives de 50 à 60 % pour le manganèse, de 75 à 80 % pour le phosphore et de 98 à 99 % pour les cations.

Il est bon de noter que ces sols sur basalte du Cameroun sont loin d'être exceptionnellement pauvres puisque les bases échangeables représentent pour l'ensemble des horizons A dans cette région du Cameroun :

— 3 à 11 milliéquivalents pour cent grammes de terre fine pour la somme calcium plus magnésium échangeables

— 0,2 à 0,5 milliéquivalents pour cent grammes de terre fine pour le potassium échangeable.

Ce sont des chiffres satisfaisants si on les compare avec la somme des bases échangeables de l'horizon supérieur de certains sols ferrallitiques de l'Amazonie (FALESI, 1972) - Tableau VII.4.

Tableau VII.4. — *Teneurs en bases échangeables de l'horizon supérieur de quelques sols ferrallitiques d'Amazonie d'après FALESI (1972)*

	Somme des bases échangeables en A mé/100 g	Taux de saturation en A V %	Nature de la roche-mère
Latosol jaune à texture lourde 55 % d'argile en A	0,36	5	Schistes micacés du Dévonien
Latosol jaune à texture argilo-sableuse en A (35 % d'argile)	0,67	5	Gneiss et migmatites du précambrien dont la composition va de celle des granites aux granodiorites
Latosol jaune à texture moyenne en A (25 % d'argile)	0,32	3	Grès du dévonien inférieur
Sol ferrallitique dystrophe à concrétions, 20 % d'argile en A	1,75	8,8	Gneiss et migmatites du précambrien (composition allant du granite à la grano-diorite)
Sol ferrallitique eutrophe à concrétions, 19 % d'argile en A	3,95	59	idem

Extraction des bases échangeables par les réactifs suivants :
K Cl neutre et normal pour Ca et Mg
H Cl 0,05 N pour le sodium et le potassium

1.3. ROCHE-MERE, PEDOGENESE FERRALLITIQUE, FACTEURS CLIMATIQUES ET TENEURS DU SOL EN NUTRIMENTS

Dans les deux paragraphes précédents, on a vu que, si la roche-mère conditionnait souvent la richesse du sol en nutriments minéraux, cette caractéristique des sols pouvait dans certains cas être totalement indépendante de la nature de la roche-mère, comme le montre le tableau VII.4. insipré de FALESI (1972). Etant donné l'intensité de la pédogenèse ferrallitique, ceci va dans le sens de la diminution des bases et de la désaturation du complexe absorbant, aboutissant finalement à une uniformisation dans la pauvreté des sols issus de roches-mères variées.

On peut incriminer deux causes principales qui en fait sont liées : d'une part l'approfondissement des sols, d'autre part la pluviosité et sa principale conséquence le drainage.

Approfondissement des sols ferrallitiques

Plus un sol évolue et donc vieillit, plus il s'approfondit ; on conçoit facilement que les caractéristiques minérales de la roche-mère aient alors de moins en moins d'influence sur les caractéristiques chimiques de la partie supérieure du sol.

Sous climat humide (plus de 1 000 mm de pluie), les sols ferrallitiques ont fréquemment des profondeurs de 6 à 20 et même 30 mètres, l'évolution pédogénétique qui leur a donné naissance s'étendant sur des dizaines et même des centaines de millénaires (à titre d'exemple l'âge du sol sur basalte du Cameroun, Tableau VII.3., est évalué de 500 000 à 1 000 000 ans, en prenant comme hypothèse que le climat durant cette période soit resté semblable à ce qu'il est actuellement, ce qui n'est nullement prouvé). Il n'est pas étonnant que, dans ces conditions, le sol, tout au moins sur sa partie supérieure, évolue indépendamment du matériau qui lui a donné naissance.

Intensité des précipitations et du drainage

Ainsi qu'indiqué précédemment, les teneurs en nutriments de la roche-mère ne se répercutent pas toujours jusqu'à la surface du sol en milieu ferrallitique. Effectivement, en régions humides, la pluie est un facteur essentiel de l'appauvrissement des sols. Constamment supérieure à l'évapotranspiration potentielle (cas de la Guyane, de l'Amazonie, du Gabon, etc.), on conçoit qu'elle puisse engendrer un flux important d'eau de drainage percolant à travers le sol. Cette action s'accroît du fait que les précipitations les plus intenses sont souvent concentrées sur de courtes périodes : ainsi dans la région d'Abidjan, la moitié du drainage (400 mm sur 900 mm) a lieu en 2 à 3 mois (ROOSE, 1973 et 1974) alors que la saison des pluies s'étend sur près de 9 mois.

On pourrait penser que ce phénomène ne joue plus, ou fort peu, dans ces régions à deux saisons bien contrastées (une saison sèche et une saison des pluies) où l'évapotranspiration potentielle dépasse largement le volume des précipitations. En fait la concentration des pluies sur quelques mois engendre un drainage d'une intensité certaine, alors qu'en pleine saison sèche, l'évapotranspiration potentielle est maximale tandis qu'il n'y a plus d'humidité à évaporer.

D'où l'intérêt de connaître le volume des eaux de drainage, et l'on est généralement obligé de se contenter de l'estimer par les diverses méthodes exposées au chapitre VI. Les comparaisons avec certaines mesures effectuées « in situ » en Côte d'Ivoire (ROOSE, 1973), montrent que les ordres de grandeur (cf. chapitre VI, p. 76-80) sont satisfaisants.

Limite des influences réciproques de la pluviosité et de la roche-mère

On a tenté de savoir à partir de quelle intensité de précipitation, l'action de la pluie l'emportait sur l'influence de la roche-mère. L'expérience acquise tant en Afrique occidentale qu'à Madagascar a montré qu'une pluviosité moyenne de 1 700 mm séparait approximativement deux catégories de pédogenèse en ce qui concerne la saturation par les bases du complexe absorbant des sols ferrallitiques : pour des pluviosités inférieures à 1 700 mm, les caractéristiques de la roche-mère influent nettement sur les teneurs en bases du complexe d'échange, tandis qu'au dessus de 1 700 mm de pluie, les sols sont uniformément pauvres et désaturés quelle que soit la nature pétrographique du matériau qui leur a donné naissance.

Il s'agit évidemment là d'une règle empirique. Si elle permet d'expliquer pourquoi les sols du Gabon, d'Amazonie, de basse Côte d'Ivoire, etc. sont uniformément dépourvus de bases malgré les substratum variés, elle souffre de nombreuses exceptions : par exemple les sols de la vallée du Niari issus de schistes calcaires ou ceux du sud du Brésil formés sur basaltes sont désaturés et acides malgré la richesse de la roche-mère et une pluviosité actuelle qui atteint approximativement 1 200 millimètres dans les deux cas.

Elle ne peut non plus, inversement, rendre compte de la fertilité due à l'abondance de nutriments minéraux de certains sols.

1.4. FACTEURS AGISSANT EN SENS INVERSE DE L'EVOLUTION FERRALLITIQUE

Le rajeunissement des sols par érosion ou apport

Dans le cas de pentes constamment décapées par l'érosion, les sols restent peu épais et, l'influence de la roche-mère s'y faisant fortement sentir, ils sont chimiquement plus riches que les sols profonds de plateaux voisins. Aussi en arrive-t-on à la conclusion quelque peu paradoxale que les premiers sont les plus favorables à une mise en valeur agricole (BOISSEZON et GRAS, 1970 au Congo ; BOURGEAT et *al*, 1973, à Madagascar, etc.). En cas de cultures sarclées, leur exploitation pose de tels problèmes de conservation qu'ils ne peuvent être cultivés longuement sans une sérieuse mise en défens contre l'érosion. (Par contre une culture itinérante de faible durée, un an le plus souvent, deux ans au maximum, est généralement possible sans occasionner de dégâts sensibles). Une utilisation rationnelle de ces sols est de les réserver à des cultures pérennes riches (cacaoyer, caféier, palmier à huile...) ; ce type de culture, par le couvert intégral du sol qu'il procure, dispense assez souvent des travaux anti-érosifs onéreux et, dans le cas contraire, assure une rente suffisante pour les amortir.

Un autre type de « rajeunissement » des sols ferrallitiques est le saupoudrage par des cendres volcaniques : celle-ci apportent des minéraux qui en s'altérant enrichiront en bases le complexe absorbant (SEGALEN, 1967). C'est un cas fréquent dans les régions volcaniques, qui explique souvent la fertilité « exceptionnelle » de certains sols ferrallitiques pourtant fortement évolués.

L'un des cas les plus remarquables de ce type de rajeunissement se situe aux Nouvelles Hébrides où des cendres volcaniques, déposées presque chaque nuit, assurent d'excellents rendements en cacao et coprah à une culture associées cacaoyers-cocotiers établie sur sol ferrallitique désaturé pénévolué (AUBERT, com. pers.).

Les remontées biologiques dues à l'action de la faune du sol

Ces remontées biologiques peuvent être dues à l'action de la *faune du sol* : les termitières, en particulier, sont le siège d'une accumulation de sels minéraux (BOYER Ph., 1956 ; STOOPS, 1964) ; on y a aussi observé localement des concrétions calcaires et des accumulations de sels solubles liées à des phénomènes hydriques (BOYER Ph., 1959 ; WATSON, 1969). Malgré l'ampleur de l'action des termites en certaines régions (SYS, 1957), cet enrichissement du sol par les termitières peut avoir des conséquences agricoles variables suivant les zones géographiques et les types de termitières (1).

Notons toutefois qu'après arasement, l'emplacement des énormes termitières épigées d'Afrique Centrale reste parfaitement stérile, en raison de l'absence de matière organique et d'une structure défavorable. Par contre, si l'on veut faire des cultures vivrières sur certains sols lessivés et appauvris de Thaïlande, il est nécessaire d'utiliser les termitières afin de profiter de leur plus grande richesse chimique (THORP, 1967). Et on propose, en Rhodésie, d'employer la terre des termitières comme amendement (WATSON, 1977).

Les remontées biologiques dues à la végétation

La *végétation* a un rôle similaire mais beaucoup plus régulier et plus uniformément réparti.

---

(1) On voudra bien consulter à ce propos le Tome IV, Chapitre 3 (G. BACHELIER).

Dans les exemples cités ici (Tableaux VII.1. et VII.3.), l'horizon supérieur du sol est enrichi en bases par rapport aux autres horizons plus profonds, et il serait possible de multiplier les exemples de ce type de par le monde.

Cet enrichissement est essentiellement dû à l'action des racines qui vont puiser en profondeur une certaine quantité d'éléments, lesquels se trouvent incorporés ensuite aux tissus végétaux aériens, puis restitués à la partie superficielle du sol. NYE et GREENLAND (1960) estiment que les remontées annuelles d'éléments par la grande forêt du Ghana sont de 58 Kg de potassium et de 40 Kg de phosphore, ces éléments faisant retour au sol soit rapidement (feuilles), soit à échéance (parties ligneuses).

A ce propos, NYE (1961) calcule que le renouvellement annuel des éléments minéraux dans la masse végétale (« turn-over » des Anglo-Saxons) est de 12 % pour l'azote, 10 % pour le phosphore, 32 % pour le potassium, 12 % pour le calcium et 18 % pour le magnésium.

Il s'agit là d'une estimation moyenne pour une forêt sempervirente ; il est bien évident que selon les espèces végétales et surtout les organes de ces végétaux, ces vitesses peuvent varier ; ainsi BOYER J. (1973), étudiant la libération des éléments minéraux à partir des feuilles de cacaoyers tombées au sol, trouve que celles-ci perdent :

— en un an 60 à 70 % de leur azote
50 à 60 % de leur phosphore

— en six mois 90 % de leur potassium, élément particulièrement mobile parce que sous forme soluble dans les feuilles.

Tous ces éléments peuvent être immédiatement réutilisés par l'arbre.

Il existe un mouvement continuel d'éléments minéraux entre la végétation et le sol. BERNARD-REVERSAT (1976) calcule que, dans la forêt du Banco près d'Abidjan, les éléments végétaux qui constituent la litère apportent chaque année au sol, par hectare, 158 Kg de N, 8,5 Kg de P, 33 Kg de K, 65 Kg de Ca et 35 Kg de Mg.

Si on ajoute les quantités enlevées à la végétation par l'eau de pluie ruisselant sur le feuillage, on aboutit à des totaux importants, surtout si on les compare aux réserves d'éléments échangeables contenus dans le sol (tableau VII.5.).

TABLEAU VII.5. — *Eléments provenant de la végétation et éléments présents dans le sol Forêt du Banco — Côte d'Ivoire d'après BERNHARD-REVERSAT (1976)*

	N	P	K en Kg/ha/an	Ca	Mg
Apports annuels par la litière	158	13,6	80	85	35
Apports annuels par pluvio-lessivage	60	10	170	31	41
Total apports végétation	218	23,6	250	116	76
	N 0-10 cm		K éch. 0-50 cm	Ca éch. 0-50 cm	Mg éch. 0-50 cm
Réserves du sol en azote total sur 10 cm et en bases échangeables sur 50 cm	1 200		90	200	110

On comprend à la lecture des chiffres ci-dessus, surtout ceux qui concernent les bases échangeables, que la grande forêt ombrophile ne peut s'alimenter et vivre sur des sols pauvres qu'en utilisant au maximum le recyclage continuel des éléments biogènes.

Une des caractéristiques de la ferrallitisation étant l'approfondissement progressif du sol, il s'ensuit une difficulté, puis une impossibilité pour les racines d'atteindre la base de l'horizon d'altération, donc de compenser ainsi les pertes inévitables dues à la lixiviation ; la plante vit alors en cycle fermé sur des réserves petit à petit amenuisées par le drainage. Ce phénomène est particulièrement net pour les sols situés sous les climats les plus pluvieux ; d'où la pauvreté chimique de tant de sols d'Afrique Centrale (Gabon, Cameroun, Congo, Zaïre) ou d'Amérique du Sud (Amazonie, sols de Cerrado au Brésil) et d'Asie (COULTER, 1972, pour la Malaisie).

Les transports qui affectent souvent les sols ferrallitiques peuvent contribuer à l'appauvrissement des sols déjà pauvres, qu'il s'agisse de remaniement à courte distance (BOISSEZON et GRAS, 1970 au Congo), ou de transports plus importants (sols dits de Barreiras au Brésil, sols de Llanos de Colombie et du Vénézuela). Au moment où ils se produisent, ces transports désolidarisent le sol de sa végétation, d'où une difficulté supplémentaire ou une impossibilité pour celle-ci de remplir son office de « pompe à minéraux ».

1.5. EN GUISE DE CONCLUSION

Si un sol ferrallitique riche en éléments chimiques biogènes dérive à coup sûr d'une roche-mère bien pourvue en ces éléments, la réciproque n'est pas vraie : un sol ferrallitique pauvre peut provenir de la décomposition de n'importe quel type de roche.

2. LA VÉGÉTATION

Dans le paragraphe précédent, on n'a envisagé que le cas de sols couverts de végétation naturelle, où les migrations d'éléments se produisent, sans intervention de l'homme, pendant des périodes où l'unité de temps est le millénaire ou plutôt ses multiples (dizaines et même centaines de millénaires).

Or, l'installation d'une culture exige la destruction préalable de la végétation naturelle, généralement par incinération (1) des débris végétaux ou parfois par enfouissement (dans le cas des jachères herbacées). D'où une transformation brutale, quasi-instantanée, de l'équilibre sol-végétation.

2.1. QUANTITE GLOBALE DE NUTRIMENTS CONTENUS DANS LA VEGETATION

La végétation naturelle, surtout s'il s'agit d'une forêt âgée, contient des quantités considérables d'éléments minéraux ainsi qu'on peut s'en rendre compte en consultant les tableaux VII.6. et VII.7. ; ceux-ci répertorient un certain nombre de données obtenues dans divers types de végétation poussant sur sols ferrallitiques fortement désaturés (sauf quelque types de sols provenant du Ghana).

(1) La technique de l'andainage total, recommandée vers 1950 pour les cultures pérennes (caféier, cacaoyer, palmier à huile, etc.), paraît actuellement à peu près abandonnée. Actuellement on préconise un système mixte : brulis des ramures et des branches, andainage à intervalles rapprochés des troncs et grosses branches.

TABLEAU VII.6. — *Eléments minéraux contenus dans la végétation sur sol jaune ferrallitique fortement désaturé de Yangambi (Zaïre) (exprimés en Kg/ha d'élément) d'après* BARTHOLOMEW, MEYER *et* LAUDELOUT *(1953)*

	N	P	S	K	Ca + Mg
Recru forestier de 2 ans	189	22,2	37,5	186	160
Recru forestier de 5 ans	567	31,3	103,3	456	421
Recru forestier de 8 ans	579	35,1	100,6	839	668
Forêt 17-18 ans	701	108	196	601	822
Panicum maximum (jachère de 3 ans)	374	37	51	351	169
Setaria sphaceleta (jachère de 3 ans)	378	35	63	273	151
Cynodon dactylon (jachère de 3 ans)	463	52	60	423	250

TABLEAU VII.7. — *Eléments contenus dans la végétation (exprimés en kilogrammes par hectare)*

	N	P	K	Ca	Mg
GHANA (NYE et GREENLAND, 1960)					
Forêt sempervirente (40 ans)	1 830	125	818	2 254	346
Forêt semi décidue (20 ans)	572	39	408	527	212
Savane arbustive à *Andropogon* (20 ans)	115	22	191	270	66
Savane à *Imperata cylindrica*	44,5	29	105	13	23
Brousse arbustive côtière	281	28	277	441	104
COTE D'IVOIRE (BERNHARD, 1969)					
Forêt sempervirente du Banco (racines non comptées)	2 200	90	225	445	198
AMAZONIE BRESILIENNE (KLINGE, 1972)					
Forêt sempervirente de Manaus	7 280	128	728	2 030	816

Malgré quelques discordances dans les résultats, on peut en tirer deux conclusions importantes :

— Tout d'abord, le volume énorme d'éléments minéraux, très supérieur à ce que l'on trouve comme éléments échangeables dans le sol : par exemple, il existe environ 400 Kg/ha de potassium dans la matière ligneuse d'une forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire contre 100 à 150 Kg de potassium échangeable dans les 50 premiers centimètres du sol (qui « à titre de comparaison » contient ici 2 000 à 6 000 Kg/ha, suivant les cas, de K total), quantité tout à fait comparable à ce qui est apporté annuellement au sol par la chute des feuilles, fleurs et fruits, environ 100 Kg/ha (BERNHARD-REVERSAT, 1973).

D'une manière générale, la quantité d'éléments contenus dans la grande forêt sempervirente est supérieure, sauf pour le phosphore, à ce qui existe dans les trente centimètres supérieurs du sol (NYE et GREENLAND, 1960).

— Le pouvoir d'accumulation d'éléments minéraux par la végétation après remise en jachère. A courte échéance (trois ans), graminées et recru forestier ont à peu près le même « potentiel » d'accumulation ; par contre, âgé de six ans, ce dernier se révèle comme le meilleur « accumulateur », supériorité qui s'affirme encore lorsque la forêt est âgée de dix à vingt ans.

2.2. MODIFICATION DES CARACTERISTIQUES DU SOL PAR LES ELEMENTS CHIMIQUES CONTENUS DANS LA VEGETATION

On comprend alors le rôle de cet apport au sol lors du défrichement ; bien qu'azote et soufre (sauf ce qui est contenu dans les racines) soient perdus dans l'atmosphère dans le cas très général de l'incinération, les autres éléments représentent une fourniture souvent indispensable aux cultures dans les sols pauvres.

Tout n'est évidemment pas restitué au sol intégralement et immédiatement. Certains débris végétaux — racines, gros troncs — ne se décomposent que lentement. Les cendres peuvent être enlevées en partie par le vent et la pluie, mais, dans l'ensemble, le sol subit de profondes modifications (tableaux VII.8., VII.9. et VII.10.).

TABLEAU VII.8. — *Apport d'éléments au sol par incinération d'une forêt à Yangambi (Zaïre) d'après* LAUDELOUT *(1954)*

	Eléments échangeables				
	Teneur du sol avant incinération		Teneur du sol après incinération		Accroissement en Kg/ha
	mé/100 g	kg/ha	mé/100 g	kg/ha	
Bombolo					
Ca	0,14	39	0,96	270	231
Mg	0,12	19	0,61	97	78
K	0,067	34	0,325	165	131
Likolonga					
Ca	0,19	53	1,34	377	324
Mg	0,16	25	0,62	98	73
K	0,059	30	0,292	148	118

Ainsi, grâce à l'incinération de la forêt ombrophile de la cuvette centrale du Zaïre, le taux de calcium du sol subit une augmentation de l'ordre de 1 à 6, celui du magnésium de 1 à 3,5, celui du potassium de 1 à 4. Le pH originellement de 4,1 devient neutre (LAUDELOUT, 1954).

L'une des conséquences de la mise à feu de la végétation est la modification de l'équilibre cationique du sol ; celui-ci était, pour Ca/Mg/K, de 44/38/18 sous forêt ; il devient après brûlis 55/30/15 (LAUDELOUT et VAN BLADEL, 1967), d'où une amélioration sensible de la balance minérale.

NYE et GREENLAND (1964) ont mesuré, horizon par horizon, les modifications subies par trois parcelles de sol après abattage et brûlis de la forêt sempervirente du Ghana. De l'avis des auteurs, l'augmentation du pH et des bases échangeables de l'horizon 15-30 cm est due, au moins en partie, à une contamination des échantillons par des particules de sol tombant des horizons supérieurs.

TABLEAU VII.9. — *Modification du pH et des bases échangeables d'un sol du Ghana par brûlis de la forêt d'après* NYE *et* GREENLAND *(1964)*

Parcelles	Prof. cm	pH		Ca mé/100 g		Mg mé/100 g		K mé/100 g	
		avant	après	avant	après	avant	après	avant	après
MB	0-5	5,2	7,6	4,3	11,2	2,2	2,8	0,4	1,2
	5-15	4,5	5,7	1,0	4,5	0,8	1,5	0,2	0,6
	15-30		4,7		3,0		1,2		0,4
MC	0-5	5,2	8,0	4,0	12,7	1,9	2,9	0,4	1,5
	5-15	4,7	7,4	1,2	5,0	0,9	1,5	0,2	0,8
	15-30		5,5		2,5		1,1		0,5
LP	0,5	5,2	8,1	7,2	21,2	2,6	3,9	0,5	2,5
	5-15	4,9	6,2	2,0	5,0	1,2	1,6	0,3	0,9
	15-30	4,9	6,2	1,7	3,8	1,2	1,4	0,4	0,5

Gain global pour le sol sur 30 cm de profondeur d'éléments échangeables à la suite du brûlis des parties aériennes	Ca Kg/ha	Mg Kg/ha	K Kg/ha
	2 775 (± 219)	260 (± 21)	689 (± 65)

Cette importance de l'apport par la végétation brûlée fut évaluée également par TURENNE (1969) sur un « abattis » en Guyane Française trois mois après le brûlis léger guyanais, simple feu courant qui respecte, plus que les feux africains, les troncs et les grosses branches (Tableau VII.10.).

TABLEAU VII.10. — *Bases échangeables du sol avant et après brûlis en Guyane d'après* TURENNE *(1969)*

	Milliéquivalents pour 100 g de sol						
	Ca	Mg	K	Na	S	T	V %
— Sol « pauvre » sous forêt	0,15	0,10	0,12	0,07	0,44	3,8	11,6
— 3 mois après brûlis	0,79	0,41	0,11	0,06	1,37	5,4	25,4
— Sol parmi les plus « riches » sous forêt	0,53	0,37	0,21	0,12	1,23	12,2	10,1
— 3 mois après brûlis	3,90	3,02	0,38	0,18	7,48	9,8	76,3

Si l'accroissement en calcium et magnésium échangeables reste important et du même ordre de grandeur qu'à Yangambi, celui du potassium est plus irrégulier ; compte tenu des aléas de l'analyse, cette différence provient sans doute du fait que le feu ne détruit pas tout ici, et certainement aussi parce que trois mois constituent un intervalle de temps suffisant pour, au moins, amorcer une lixiviation notable des bases et en particulier du potassium.

En conclusion de ce paragraphe sur l'apport d'éléments lors du défrichement, il faut souligner que l'augmentation de fertilité provoquée par l'incinération de la végétation représente souvent un facteur indispensable à la réussite des cultures dans les sols ferrallitiques très pauvres, mais c'est aussi une fertilité éphémère (NYE et GREENLAND, 1964 ; BERGER, 1964) ; c'est un aspect qui sera développé dans les paragraphes consacrés à la dynamique des éléments minéraux du sol (chapitre X).

3. L'ATMOSPHÈRE

L'eau de pluie contient toujours une certaine quantité d'éléments chimiques, et d'autre part, l'atmosphère est le fournisseur primaire unique pour l'azote.

3.1. L'AZOTE

Certains auteurs (PETERS, 1972) ont souligné que les plantes seraient capables d'absorber l'ammoniac de l'air jusqu'à concurrence de 10 % de leurs besoins globaux en azote. De telles études concernent surtout les parties industrielles des zones tempérées. Il est probable, qu'en dehors du voisinage immédiat de certaines grandes métropoles comme São Paulo au Brésil, l'azote ammoniacal ne joue qu'un rôle mineur dans la couverture des besoins azotés des plantes cultivées sous les tropiques.

La pluie contient toujours en solution un peu d'azote

A Addis-Abeba, RICHARD (1964) a trouvé un total annuel de 9,44 kilogrammes d'azote par hectare, principalement sous forme ammoniacale, et il constate que ce chiffre est très voisin de ceux indiqués par KOCH, CORBERT et lui-même pour Ceylan, la Malaisie et le Sud-Viet-Nam : 10 à 14 Kg/ha. Au Zaïre, MEYER et PAMPFER (1959) ont recueilli à Yangambi 5,37 Kg/ha d'azote total (dont 3,16 sous forme ammoniacale) pendant une année. A la station agronomique de Campinas (Etat de São Paulo, Brésil), on a trouvé des quantités d'azote rapportées à l'hectare de 3 à 9 Kg par an à peu près également répartis entre la forme nitrique et la forme ammoniacle (WUTKE, 1972).

Dans l'ensemble, on estime qu'un apport par les pluies de 7 kilogrammes d'azote par hectare et par an représente une moyenne dans les sols tropicaux (ERIKSON, 1952). Il semble que l'Afrique Occidentale soit favorisée quelque peu à cet égard. En Basse Côte d'Ivoire (1 800 à 2 000 m de pluie), GODEFROY et *al.* (1970) ont mesuré sur deux années des quantités nettement plus importantes (tableau VII.11.).

TABLEAU VII.11. — *Azote dans l'eau de pluie en Basse Côte d'Ivoire d'après* GODEFROY *et* al. *(1970)*

	1966	1967
N ammoniacal	15 Kg/ha	13 Kg/ha
N nitrique	9 Kg/ha	7 Kg/ha
N total	24 Kg/ha	20 Kg/ha

De son côté, NYE (1961), trouve 14 Kg/ha d'azote en grande partie ammoniacal dans la zone forestière du Ghana et BOYER Ja. (1973) 12 Kg/ha/an dans une cacaoyère du Sud Cameroun (1). Et pourtant, ces chiffres sont relativement faibles par rapport à ceux rapportés pour la Gambie (47 Kg/ha) et surtout le Nigéria du Nord (53 Kg/ha) par THORNTON (1963) pour des pays à vrai dire situés en limite ou en dehors de la zone de ferrallitisation.

La distribution dans l'année est assez régulière à Yangambi sous climat équatorial peu contrasté. Par contre, en Ethiopie où la saison sèche est bien marquée, la moitié de cet azote arrive au sol pendant les quelques pluies de saison sèche et les premières averses de la saison pluvieuse.

Quant à l'origine de cet azote, on s'accorde à penser que seule une partie importante de l'azote nitrique provient de l'atmosphère (synthèse effectuée par les décharges électriques) ; l'azote ammoniacal a pour origine les fermentations au sol et une petite partie de l'azote nitrique résulte d'une contamination de l'atmosphère par des poussières arrachées au sol. Pour ces deux dernières fractions, il s'agit d'une simple restitution, intéressante localement, mais qui n'intervient pas dans les apports « nets » de l'atmosphère.

On peut toutefois être étonné par les discordances entre les chiffres obtenus pour les auteurs précédemment cités. Les causes peuvent en être multiples. Certains auteurs mesurent l'azote organique recueilli dans leurs pluviomètres ; parfois, ces appareils sont installés à proximité de la forêt, d'où des apports d'azote par pluvio-lessivage (eau ruisselant sur les feuilles, enrichie de ce fait en azote et emportée à quelques centaines de mètres par les turbulences atmosphériques). Dans les deux cas, il s'agit d'une restitution au sol et non d'un apport primaire.

Fixation de l'azote de l'air par les microorganismes et les algues

Un certain nombre d'êtres vivants, bactéries aérobies et anaérobies, rhizobiums, algues, ont la propriété de fixer l'azote de l'air. Les cyanophycées, surtout citées à propos des rizières, ont peut-être plus d'importance qu'on ne le croit habituellement dans les autres sols ; à tel point que GODEFROY (1974) pense que leur action est probablement une des causes de certaines « erreurs » d'interprétation.

La question ayant été traitée au Chapitre « Flore et faune » de cet ouvrage, le lecteur est prié de s'y référer (Tome IV - Chapitre 2).

Toutefois, il paraît utile de souligner ici l'importance des quantités d'azote mises en jeu, bien que les chiffres cités par les différents auteurs varient dans des proportions considérables.

La fixation non symbiotique pourrait varier, selon VAN WAMBEKE (1971), de 4 Kg/ha au minimum à 53 Kg/ha dans les sols ferrallitiques fortement désaturés du Campo Cerrado brésilien.

Quant à la fixation symbiotique, elle est estimée pour les hauts plateaux de Madagascar à 60 Kg/ha pour le rhizobium de l'arachide et à 150-200 Kg/ha pour celui du soja (DENARIE, 1968). Au Brésil, pour des sols en majorité ferrallitiques de São Paulo, VERDADE (1969) trouve, dans une expérience en vases de végétation, que cette fixation peut varier de 43 à 204 Kg/ha d'azote fixé par an, à condition que le sol ait reçu chaux et fumure minérale en quantités telles que les rhizobiums puissent s'y développer. En Malaisie, une couverture de *Centrosema pubescens* fixe environ 235 kilogrammes d'azote par hectare et seulement 152 kilogrammes en présence d'engrais azotés (WATSON, 1957). Aux Indes, PAL et SAXENA (1975) calculent que l'inoculation du soja permet d'économiser 300 à 325 Kg/ha d'azote qu'il eut été nécessaire de fournir à la plante pour arriver à la récolte optimale. Ceci paraît un maximum, car NG SIEW KEE (1977) estime que l'apport d'azote par Pueraria Javanica ou calopogonium en couverture équivaut annuellement à un apport de 100 à 200 kilogrammes par hectare de nitrate d'ammoniaque (à 26 % de N).

(1) On pourra comparer ces chiffres avec ce qui est communément considéré en France, pays tempéré, comme moyenne de l'azote apporté par les pluies, soit 10 à 15 kilogrammes par hectare.

A noter que DOMMERGUES (1963) estime la fixation symbiotique, pour la zone intertropicale en général, à 100 Kg/ha d'azote dans les meilleures conditions, à 40-50 Kg/ha le plus souvent, alors que BARTHOLOMEW (1971) pense qu'elle peut atteindre jusqu'à 500 Kg/ha pour le soja et la luzerne aux Etats-Unis d'Amérique.

Point important à souligner : la fixation symbiotique par les rhizobiums des légumineuses spontanées dans leur environnement naturel, ici la forêt, paraît très faible : sans doute inhibée par les taux élevés d'azote du sol (WHITE et *al.*, 1955 ; BARTHOLOMEW, 1972), elle n'acquiert une certaine importance que s'il y a appauvrissement accidentel du sol en azote (BERLIER, 1958 en Côte d'Ivoire ; BONNIER et SEEGER, 1958 au Zaïre) ; de même, cette fixation diminue en présence d'engrais azotés (WATSON, 1957).

Fixation d'azote atmosphérique par des plantes supérieures autres que les légumineuses — Le Spirillum

Quelques auteurs, russes en particulier, ont supposé que certaines protéines contenues dans le parenchyme des feuilles étaient capables de fixer un peu d'azote atmosphérique. Rien ne permet actuellement de confirmer cette hypothèse.

Il ne s'agit là que de l'azote atmosphérique et non pas des composés azotés qui peuvent s'y trouver, accidentellement ou non. En effet, les feuilles des plantes peuvent absorber l'ammoniac de l'air ; cela contribuerait à 10 % de leurs besoins en azote (PETERS, 1972), ce qui paraît tout de même un peu élevé (l'air contient normalement quelques dizaines de microgrammes d'ammoniac, jusqu'à 200 microgrammes dans les zones très fortement urbanisées).

Par contre, il apparaît actuellement bien prouvé que la rhizosphère de certaines plantes, graminées en particulier, fixe l'azote atmosphérique.

Il s'agit là d'une aventure scientifique relativement récente. Une microbiologiste brésilienne, Johanna DOBEREINER, observe des augmentations d'azote du sol qu'elle suppose, sans en être sûre, provenir de fixations d'azote atmosphérique au niveau de racines de graminées. En association avec deux chercheurs de Rothamsted (DOBEREINER, DART et DAY, 1972), elle confirme qu'il existe dans la rhizosphère de *Paspalum notatum* une nitrogenase capable de fixer l'azote atmosphérique ; à tel point que sur les 90 kg d'azote par hectare fixés par le sol où pousse ce *Paspalum*, environ la moitié (45 kg) pourrait provenir de l'action de la nitrogenase. On démontre peu après que l'agent responsable est une bactérie, un *Spirillum*, très probablement *Spirillum lipoferum* déjà décrit par BEIJERINCK en 1925.

En résumant l'excellente revue faite par DOBEREINER (1977), il ressort que :

— Le *Spirillum* présente un maximum d'activité entre 28 et 35°, ce qui en fait une bactérie « tropicale ». De fait, on en trouve assez peu en conditions tempérées.

— Le *Spirillum* vit certainement sur les racines de nombres de graminées fourragères (*Panicum, Bracchiaria, Pennisetum, Digitaria* en particulier) ainsi que sur celles du blé. Sa présence à l'état spontané sur maïs, sorgho et seigle n'est prouvée qu'au Brésil, mais il semble qu'il s'acclimate fort bien à toutes les céréales, et probablement aussi au manioc et à la patate douce.

— Le *Spirillum* se nourrit de préférence de malates, succinates, piruvates... et assez peu de sucres. En sol bien fourni en azote, il est capable d'utiliser les nitrates et même, s'il y a excès, de provoquer une dénitrification par réduction des nitrates (secrétion d'une nitrato-réductase).

— La fixation d'azote atmosphérique se réduit en intensité s'il y a fourniture parallèle d'engrais azotés, l'inhibition complète survenant vers 200 Kg/ha de N.

D'après NERY, ABRANTES, DOS SANTOS et DOBEREINER (1977), le potentiel de fixation d'azote atmosphérique par le *Spirillum* est de 800 grammes d'azote par hectare et par jour, expérience réalisée sur blé au laboratoire et au champ dans un latosol « Roxo » du Brésil. Ces auteurs précisent que les engrais azotés jusqu'à 50 Kg/ha d'azote ne gênent

pas le *Spirillum* ; par contre, avec 75 Kg/ha de N, il y a des signes d'un très net ralentissement de la fonction fixatrice.

Le lecteur pourra peut-être penser que la place faite ici au *Spirillum* et à sa fonction de fixation est disproportionnée par rapport à celle réservée aux autres sources d'azote. Il apparaît cependant qu'il s'agit là d'une découverte majeure comme il ne s'en produit que quelques-unes par siècle. Dans ce domaine si controversé de la fourniture d'azote aux plantes, la seule preuve de l'existence du *Spirillum* ouvre une voie de recherche dont on voit encore mal où elle peut mener. Mais il est certain qu'elle peut se révèler très prometteuse.

Gains globaux d'azote par le sol

On est loin de tout connaître sur la façon dont un sol peut s'enrichir en azote. Aussi est-il intéressant de comparer les chiffres partiels cités ci-dessus à ceux qui ont été obtenus par JAIYEBO et MOORE (1963 et 1964) à Ibadan (Nigéria) sur des essais de jachère âgés de 6 ans, ainsi qu'à ceux cités par COULTER (1972) pour un latosol de Malaisie (Tableau VII.12).

TABLEAU VII.12. — *Evolution de l'azote et de la matière organique du sol sous différents types de couverture à Ibadan (Nigéria) d'après JAIYEBO et MOORE (1964)*

	Teneur en azote et matière organique du sol après 6 ans 0-40 cm		Accroissement du sol en azote mesuré entre janvier 1957 et décembre 1959 0-40 cm
	N total %	Matière organique %	N en Kg/ha %
Sol nu	0,093	1,4	123
Mulch d'*Imperata*	0,125	2,3	—
Jachère à *Cynodon plectostachus*	0,180	2,8	213
Jachère à *Pueraria phaseolides*	0,216	3,4	862
Recru forestier naturel	0,262	4,4	718

Quantités d'azote total % contenu dans l'horizon superficiel d'un latosol de Malaisie sous quatre types de couverture cité par COULTER (1972)

	Azote total du sol %		
Traitement	2e année	3e année	4e année
Légumineuses de couverture	0,140	0,142	0,144
Graminées	0,130	0,125	0,123
Couverture naturelle (recru forestier)	0,119	0,128	0,124
Sol nu	0,099	0,107	0,095

Au début de l'expérience, le latosol reçut un mélange tricalcique et d'engrais composé 10-17-4, soit au total 0,375 CWT/acre (42 Kg/ha).

Si l'on essaie d'interpréter les données fournies par ces deux auteurs, il se dégage une convergence nette sur le rôle très favorable des légumineuses, sur l'enrichissement du sol en azote et la nocivité de la jachère nue. Par contre, la végétation naturelle (recru forestier) paraît apporter nettement moins d'azote en Malaisie qu'au Nigéria. Il est possible qu'il s'agisse d'une différence due à la qualité de ces deux couvertures.

De leur côté, GREENLAND et NYE (1959) trouvent que l'accroissement annuel en azote après remise en jachère d'un sol cultivé est de :

22 à 56 Kg/ha/an sous recru forestier
4 à 11 Kg/ha/an sous végétation de savane.

A ce propos, ces auteurs soulignent l'importance de la notion du taux d'équilibre de la matière organique (carbone et azote) dans les sols, notion reprise sous forme de modèle mathématique par BARTHOLOMEW et DON KIRKHAM (1960) et LAUDELOUT (1961) : dans un sol à l'équilibre sous végétation naturelle, les gains et les pertes de carbone et d'azote se compensent et le sol ne s'enrichit plus. Le défrichement et quelques années de culture provoquent des pertes qui peuvent amener le sol en moyenne à 50-60 % de son état d'équilibre azoté et carboné. Les gains globaux d'azote cités plus haut par GREENLAND et NYE (op. cit.) sont, bien sûr, valables pour un tel sol à 50-60 % de son état d'équilibre ; ils sont appelés à s'amenuiser sous jachère naturelle au fur et à mesure que le sol se rapproche de l'équilibre et à s'annuler lorsque l'équilibre est atteint.

En sol intensément cultivé, donc assez loin de cet état d'équilibre, il semble que les potentialités d'enrichissement en azote soient nettement plus élevées sous les tropiques qu'en pays tempérés : BALANDEAU (1) cite des gains annuels d'azote d'une quarantaine de kilogrammes par hectare en culture continue de blé à Rothamsted (Angleterre), mais de 76 à 86 kg sous rizière aux Philippines et de 200 kg par hectare sous Digitaria au Brésil.

La définition de cet équilibre se heurte en outre à un certain nombre de difficultés ; il est fonction, en particulier, de la richesse chimique du sol et du bon équilibre des anions et des cations entre eux. Comment expliquer autrement la remarque de MC WALTER et WIMBLE (1976) qui, sur un essai de jachères de longue durée en Ouganda, constatent que l'enrichissement du sol en azote dépend beaucoup plus de la fumure phosphatée que de l'espèce végétale, graminée ou légumineuse, qui constitue la jachère !

3.2. LE SOUFRE

Le soufre qui existe dans le sol peut évidemment provenir de certains minéraux des roches-mères, comme le gypse, assez rare sous les tropiques humides, la pyrite, la calcopyrite, etc. ; mais il semble que la majeure partie de cet élément que l'on trouve dans les sols ferrallitiques provienne de l'atmosphère (NYE et GREENLAND, 1960) par l'intermédiaire de la pluie, bien que les plantes soient capables d'absorber l'anhydride sulfureux présent dans l'atmosphère (COLEMAN, 1966).

Les quantités de soufre contenues dans l'eau de pluie sont assez faibles : deux à trois kilogrammes par hectare et par an en Côte d'Ivoire (MATHIEU et MONNET, 1970), un kilogramme sur les hauts plateaux du Kenya (HESSE, 1957), chiffre qui correspond aux retombées de soufre dans les zones rurales d'Australie et de Nouvelle-Zélande (WHITEHEAD, 1967).

Les opinions sont partagées en ce qui concerne l'origine du soufre de la pluie. Il est certain que, dans les régions où le volcanisme est actif, il peut y avoir des émissions sulfureuses rabattues au sol par le vent et la pluie, mais ceci n'intéresse que des aires restreintes. L'existence d'un centre industriel peut aussi entraîner des émissions importantes de soufre dans l'atmosphère mais elles aussi très localisées ; ainsi, on constate un apport au sol de 20 kilogrammes par hectare et par an de soufre élément au centre de São Paulo (Brésil)

(1) Conférence prononcée lors de la réunion de l'A.F.E.S. le 12 février 1981 à Paris.

et seulement 10 Kg/ha/an à Jangada, un peu en dehors de cette agglomération (MALAVOLTA, 1967) ; à vrai dire, des agglomérations industrielles de l'ampleur de celle de São Paulo sont rares dans la zone des sols ferrallitiques.

Le plus souvent, on considère que le soufre recueilli dans l'eau de pluie provient des fermentations au sol et des combustions, accidentelles ou non, des matières végétales ; ainsi, les feux de brousse, si fréquents en savane, peuvent représenter un important facteur d'homogénéisation des teneurs en soufre du sol, avec une tendance à l'enrichissement des forêts humides proches des savanes.

A ce soufre continental, il faut ajouter un soufre d'origine marine transporté par les aérosols : MATHIEU et MONNET (1970) attribuent à la diminution des retombées d'aérosols marins en fonction de la distance à l'océan, la différence des retombées entre deux stations de Côte d'Ivoire, l'une distante de la côte de quatre vingt kilomètres et l'autre de six cents kilomètres ; les deux stations étant toutes les deux en forêt et recevant la même tranche de pluie, 1 400 mm, les quantités de soufre recueillies dans l'eau de pluie sont respectivement de 3,6 et 2,6 Kg/ha/an de soufre métal. C'est d'ailleurs un fait constaté par de nombreux agronomes que les carences en soufre sont à peu près inexistantes à moins de cinquante kilomètres des côtes et qu'elles sont rares entre cinquante et cent kilomètres. Dans le cas de vents dominants venant des océans, les aérosols peuvent aller fort loin à l'intérieur des terres.

3.3. LE CHLORE

Parce que très mal retenu par le sol et fortement lixivié, le chlore que l'on trouve dans les sols ferrallitiques à l'état de traces semble surtout être d'origine marine. Toutefois, on ne peut négliger, en dehors des accidents que représentent les émissions volcaniques ou les fumées industrielles, une origine continentale à partir des aérosols s'élevant de certaines nappes d'eau comme le lac Victoria (VISSER, 1961), ou même par suite d'une libération de chlore libre dans l'atmosphère par les sols très acides selon l'hypothèse de GORHAM (1958).

Les quantités apportées annuellement par l'eau de pluie ne sont pas négligeables : 11 Kg/ha à Kampala en Ouganda selon VISSER (op. cit.), 12,70 Kg/ha à Kadé au Ghana d'après NYE (1961). Mais elles décroissent vite lorsqu'on s'éloigne de la mer ; c'est ainsi qu'en Côte d'Ivoire, on trouve 16 Kg/ha de chlore à 80 kilomètres de l'océan et moins de 7 Kg/ha à 600 km de la côte pour une pluviosité sensiblement la même dans les deux cas, 1 400 mm (MATHIEU et MONNET, 1970). Malgré cette décroissance, il semble que ces aérosols puissent aller fort loin à l'intérieur des continents ; il y a en effet peu de régions où l'on connaisse des carences caractérisées en chlore.

Toutefois, OCHS et OLLAGNIER (1971 et 1972) ont signalé des déficiences en chlore sur palmiers à huile soit dans les masses continentales (Zaïre) soit dans certains microclimats (Colombie) et il est fort possible que l'on découvre ultérieurement d'autres cas semblables.

3.4. LES CATIONS ALCALINS ET ALCALINO-TERREUX

Bien que la roche-mère représente l'origine la plus certaine de ces éléments, on ne peut toutefois négliger la petite partie que l'on trouve dans les eaux de pluie.

On trouvera sur le tableau VII.13. les résultats obtenus au Zaïre (MEYER et DUPRIEZ, 1959), au Ghana (NYE, 1961), en basse Côte d'Ivoire (ROOSE, 1974) et au Cameroun (BOYER Ja., 1973) ; il existe entre eux une discordance certaine, peut-être imputable partiellement aux apports de poussières de l'Harmattan, vent sec venant du Sahara, dont

l'influence est plus sensible en Afrique Occidentale (Ghana - Côte d'Ivoire) qu'en Afrique Centrale (Zaïre). Toutefois, BARLET (1974) indique pour la Côte d'Ivoire des retombées de 7,0 à 7,5 Kg/ha de potassium, ce qui est encore inférieur à l'ordre de grandeur trouvé par BOYER Ja. et NYE.

TABLEAU VII.13. — *Eléments minéraux apportés annuellement par l'eau de pluie en Afrique (exprimés en élément-métal)*

Pays	Auteurs	K Kg/ha	Ca Kg/ha	Mg Kg/ha
Zaïre				
Kinchassa	MEYER et	1,410	4,580	0,920
Yangambi	DUPRIEZ	2,050	3,880	1,150
Mulunga	(1959)	3,040	4,080	1,260
Côte d'Ivoire	ROOSE			
Abidjan	(1974)	5,25	30,4	7,2
Ghana				
Kade	NYE (1961)	17,47	12,65	11,31
Cameroun	BOYER Ja.			
Yaoundé	(1973)	12,0	3,8	1,5

Quoiqu'il en soit, on ne peut qu'être frappé par l'abondance des retombées en potassium en Afrique Occidentale au moins. Même si l'on s'en tient aux chiffres de BARLET pour la Côte d'Ivoire, ils correspondent approximativement au dixième des exportations d'une récolte normale (BARLET, 1974).

Constatant que les proportions relatives de ces cations entre-eux sont à peu près celles qui existent dans les formations végétales, dans les sols forestiers et surtout dans les sols après incinération, MEYER et DUPRIEZ (op. cit.) concluent qu'ils se trouvent en présence de poussières terrigènes ; il ne s'agirait donc ici que d'une simple restitution, mais cet apport n'est probablement pas négligeable pour les sols très pauvres, surtout si l'on se réfère aux chiffres de NYE.

Cette hypothèse de l'origine exclusivement terrigène des cations contenus dans l'eau de pluie est, il faut le dire, largement discutée ; pour MATHIEU et MONNET (1970) qui ont travaillé en Côte d'Ivoire, le sodium provient en quasi-totalité des aérosols marins même à 600 km de la côte, tandis que le potassium — cation le plus abondant dans les eaux de pluies —, est presque uniquement d'origine terrestre ; quant au calcium et au magnésium, une fraction d'importance variable relève des aérosols tandis que le reste est contenu dans les poussières surtout organiques (pollen, microorganismes, débris végétaux minuscules), plus abondantes d'ailleurs en zone forestière qu'en savane.

Il peut être intéressant d'estimer l'importance des aérosols au moins près des côtes ; BUAT-MENAR (1972) trouve dans les pluviomètres installés dans la zone des sols ferrallitiques de l'Etat de Bahia au Brésil, les quantités suivantes pour 4 mois (Mai à Septembre 1972), pluviomètres où un filtre élimine tout ce qui est poussière végétale et minérale, afin de ne garder que les retombées solubles (tableau VII.14.).

On peut noter immédiatement la décroissance de ces apports à partir de la côte.

Seconde constatation : les contaminations terrigènes paraissent très faibles car les rapports pondéraux entre ces divers cations sont voisins de ceux de l'eau de mer.

TABLEAU VII.14. — *Eléments minéraux en solution dans l'eau de pluie (poussières exclues) — Etat de Bahia (Brésil) d'après* BUAT-MENAR *(1972)*

	Pluviosité en 4 mois	Retombée totale soluble moyenne mg/m²			
		Na	K	Mg	Ca
Salvador (côte)	650 mm	56,9	4,25	7,5	5,1
Cruz das Almas (50 km de la côte)	314 mm	9,0	1,21	1,44	1,44

Pour s'en tenir à l'élément le plus abondant, le sodium, en rapportant les chiffres du tableau VII.14. à la pluviosité moyenne de Salvador (1 900 mm par an) et de Cruz das Almas (1 200 mm par an), on trouve la retombée annuelle suivante :

— pour Salvador : 1 800 g/ha de Na, soit 79 équivalents/gramme par ha, soit un apport de 0,0003 mé/100 g pour la couche de sol de 0 à 20 cm (2 500 T/ha)

— pour Cruz das Almas : 340 g/ha, soit 14 équivalents/gramme par hectare, soit un apport annuel de 0,0005 mé/100 g.

Il suffirait donc théoriquement de moins de 10 ans pour Salvador, et d'environ 20 à 30 ans pour Cruz das Almas pour atteindre des teneurs en sodium jugées « normales » dans les sols ferrallitiques, à condition, bien sûr, qu'il n'y ait pas lixiviation.

Le même calcul appliqué aux autres éléments donnerait pour Salvador une retombée soluble annuelle de 0,001 milliéquivalent de potassium pour 100 gr de sol, 0,007 milliéquivalent de magnésium et 0,003 milliéquivalent de calcium, étant entendu que ces chiffres doivent être approximativement divisés par 3 pour Cruz das Almas à 50 km de la côte.

Il s'agit, bien sûr, de quantités très faibles, sans grande importance pour les sols bien pourvus en bases ; il n'en est peut-être pas tout à fait de même pour les sols ferrallitiques très pauvres, où les teneurs en éléments échangeables se situent en deçà du seuil de sensibilité des analyses. Les sels solubles ne sont pas les seuls en cause ; il existe aussi des formes insolubles. BARLET (1974) et BARLET et *al.* (1976) ont mesuré en Côte d'Ivoire les quantités globales de potassium, fractions soluble et insoluble, et trouvent des chiffres étonnants : l'apport total de potassium, qu'il s'agisse de forêt, de savane ou de la bande côtière, sont respectivement de 7,5, de 7,4 et de 7 kg par hectare et par an (1) ; en outre, les 9/10^{e} de ce potassium, sont déjà sous forme échangeable. Ceci représente à peu près en moyenne un dixième du potassium échangeable exporté par une culture.

Ces données ne sont peut-être pas applicables aux éléments autres que le potassium ; mais, si elles le sont, on comprend la conclusion de cet auteur : « ces chiffres peuvent expliquer le regain de fertilité des sols après 10 ans de jachère ».

Quoiqu'il en soit, il serait dangereux de transposer brutalement ces chiffres en des lieux autres que la Côte d'Ivoire. En effet, le climat de ce pays se caractérise en saison sèche par la présence d'un vent sec de nord-est, l'Harmattan, souffle puissant provenant du Sahara central et méridional ; ce vent transporte beaucoup de poussières où peut se trouver du potassium.

(1) On a cité des quantités beaucoup plus importantes de potassium dans les eaux de pluies : 1 à 13 mg/1 par exemple dans l'Ile Maurice (HARDY, 1965), jusqu'à 10 mg/1 en Afrique de l'Ouest, ce qui correspondrait à une fumure de 100 kg de K_2O par hectare et par an (GENEVOIS, 1967). L'ampleur de ces chiffres laisse supposer que certains facteurs ont dû jouer en dehors de la pluie (contamination, pluvio-lessivage, etc.).

4. CONCLUSION

Si l'atmosphère apporte normalement au sol azote, chlore et soufre, on considère habituellement que la roche-mère est le principal et quasi-unique fournisseur de bases, de phosphore et d'oligo-éléments ; toutefois dans certaines situations, comme dans les zones soumises à un régime de vents chargés de poussières, il peut y avoir un apport éolien important de cations, en particulier de potassium. Quoiqu'il en soit, les conditions propres à la ferrallitisation provoquent un appauvrissement considérable du sol par rapport à la roche qui lui a donné naissance, appauvrissement quelque peu freiné par l'action de la végétation en ce qui concerne la partie supérieure du sol.

Lors du défrichement de sols ferrallitiques couverts de forêts ou de leur remise en culture sous jachère, l'apport d'éléments par les végétaux incinérés ou non représente une contribution importante, parfois essentielle, à la fertilité de ces sols malgré son caractère quelque peu fugace.

formes des éléments chimiques en relation avec la fertilité et méthodes d'analyse

1. INTRODUCTION

Depuis que les expériences de BOUSSINGAULT démontrèrent que les plantes s'alimentaient en sels minéraux à partir du sol et depuis l'échec retentissant de Liébig, qui, voulant faire la preuve de la réalité de cette théorie, fournit à ses cultures ces minéraux en des combinaisons qu'actuellement nous désignerions comme non-assimilables, il est apparu une masse impressionnante de travaux concernant les formes les plus susceptibles d'être absorbées par les plantes parmi toutes celles qui existent dans la nature.

A côté de chaque élément considéré globalement (dit « total »), on a défini des formes « échangeable », « labile », « assimilable », ou plus modestement « extractible » par un réactif donné, etc. A travers cette multiplicité d'appellations, on s'efforce bien sûr de recouvrir ou de désigner la fraction que la plante est susceptible d'absorber. Les agronomes-chimistes du sol de la première moitié du XIX^{e} siècle s'efforcèrent d'y parvenir par l'analyse chimique des sols. Bien qu'il ne soit pas sûr — et on en verra plus loin la preuve — que le produit déterminé par un processus chimique donné, si bien choisi soit-il, corresponde exactement à ce que cet organisme vivant si complexe et si délicat qu'est la racine réussit à extraire de la terre, cette démarche a constitué un progrès considérable dans la connaissance des sols et des besoins des plantes, au point qu'il n'est plus concevable de faire une étude agronomique sans une analyse chimique du sol. Malgré une technique sinon toujours brutale, du moins artificielle, par rapport avec la délicatesse des processus physiologiques mis en œuvre par les plantes, les méthodes chimiques restent irremplaçables par leur facilité et leur rapidité d'exécution. On a bien sûr essayé des méthodes plus naturelles comme les cultures-test de moisissures (Aspergillus niger par exemple) ou de plantules diverses ; elles se sont toujours révélées comme très longues et « encombrantes », car elles se prêtent mal à la « série » ; en outre, les renseignements obtenus ne sont pas toujours faciles à interpréter. De ce fait, les laboratoires « classiques » de chimie des sols ne les emploient guère que comme complément occasionnel des méthodes chimiques courantes. Aussi n'en parlera-t-on pratiquement pas dans ce chapitre qui se veut consacré aux formes les plus couramment étudiées et aux méthodes d'analyse les plus habituellement effectuées.

En ce qui concerne les cations majeurs, le plan apparaît tout tracé. Depuis que l'anglais WAY (1850 et 1852) eut magistralement défini au milieu du siècle dernier les propriétés du complexe absorbant des sols, agronomes et chimistes du sol ont pris l'habitude de séparer, d'une part, les cations échangeables adsorbés à la surface des colloïdes et dont la fixation (ou la désorption) est régie par les équilibres de DONNAN et, d'autre part, les réserves définies comme la différence entre la totalité d'un élément présent dans le sol et la quantité de cet élément sous forme échangeable. On n'étudiera ici que Potassium, Calcium et Magnésium, car le Sodium n'est présent qu'à l'état de traces dans les sols ferrallitiques.

Pour les anions majeurs, Azote, Phosphore et Soufre, on s'efforcera, en regard de la forme totale, de dégager la part « assimilable » de cet élément, problème relativement simple pour l'azote et le soufre, mais qui s'avère beaucoup plus délicat et complexe pour le phosphore.

Quant aux oligo-éléments, il faut souvent s'en remettre à l'analyse chimique pour les définir. Enfin, on fera une place à l'aluminium en raison du rôle très important — et le plus souvent nocif — qu'il joue dans les sols ferrallitiques lorsqu'il se met sous forme échangeable.

2. LES FORMES DE L'AZOTE

2.1. GENERALITES

On considère traditionnellement que l'azote se présente dans les sols sous quatre formes :

— *l'azote dit organique* : en fait, il s'agit ici de molécules d'acides aminés qui font partie intégrante de la matière organique du sol (1). Cet azote n'est pas assimilable directement par les plantes ; il doit subir auparavant une série de transformations appelées globalement minéralisation.

— *l'azote ammoniacal* (premier stade de la minéralisation) : c'est une forme transitoire, mais dont les analyses permettent de déceler la présence constante dans les sols. L'azote ammoniacal est certainement assimilable par les racines dans une mesure que l'on connaît mal dans les sols tropicaux aérés que sont en général les sols ferrallitiques où la forme ammoniacale a une existence éphémère ; en tout cas, elle ne semble utilisée que si la forme nitrate fait défaut (WARNKE et BARBER, 1973). Quoi qu'il en soit, un certain nombre de plantes, en particulier le maïs, le riz, le blé, ont la propriété d'absorber l'azote ammoniacal seul ou en mélange avec des nitrates.

— *l'azote sous forme de nitrite* : cet azote est assimilable mais toxique. Son existence est fugace et il se transforme très rapidement en nitrates dans les conditions habituelles (aérobiose) ; on ne le rencontre en quantités notables que dans les horizons asphyxiants, les horizons hydromorphes par exemple (rares en milieu ferrallitique).

— *l'azote sous forme de nitrates* : c'est la forme de choix de l'alimentation azotée pour pratiquement toutes les plantes (le riz cultivé en rizières inondées est l'exception la plus notable : il préfère l'azote ammoniacal en raison de la très facile transformation des nitrates en nitrites toxiques dans ce milieu réducteur que constitue la rizière inondée).

L'azote organique minéralisable et son fractionnement

Avec les progrès des connaissances sur la matière organique et son évolution, on tend actuellement à dépasser cette présentation quelque peu simpliste en ce qui concerne l'azote organique.

(1) On consultera à ce sujet le tome IV de cette collection « La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques ».

Un test assez simple permet de se rendre compte de la facilité que présente la matière organique du sol à se minéraliser et on détermine ainsi la proportion d'azote facilement minéralisable : habituellement, on met le sol à incuber à l'étuve à 25-28° pendant un certain temps et on mesure l'azote minéral apparu : par exemple OLIVER et *al.* (1978), reprenant les conditions exposées par BREMMER (1965), déterminent la quantité d'azote minéralisé par un sol ferrallitique de Madagascar pendant un temps donné.

Notons tout de suite que cette hydrolyse acide du type de celle de BREMMER (op. cit.) a l'avantage de faire apparaître dans l'azote hydrolysable les hexosamines et les acides aminés à côté de produits non identifiés (cf. paragraphe suivant).

Des processus plus élaborés font intervenir les fractionnements de la matière organique exposés dans le tome IV de cette série et qu'il n'est donc pas question de reprendre ici.

Toutefois, des résultats récents obtenus sur les sols ferrallitiques de Guyane française, sous couvert forestier, laissent supposer (TURENNE, 1977) qu'une bonne partie de l'azote organique du sol — en particulier les acides α aminés — est liée à la fraction « acides fulviques » de l'humus, la plus mobile et la moins stable.

2.2. METHODES D'ANALYSE

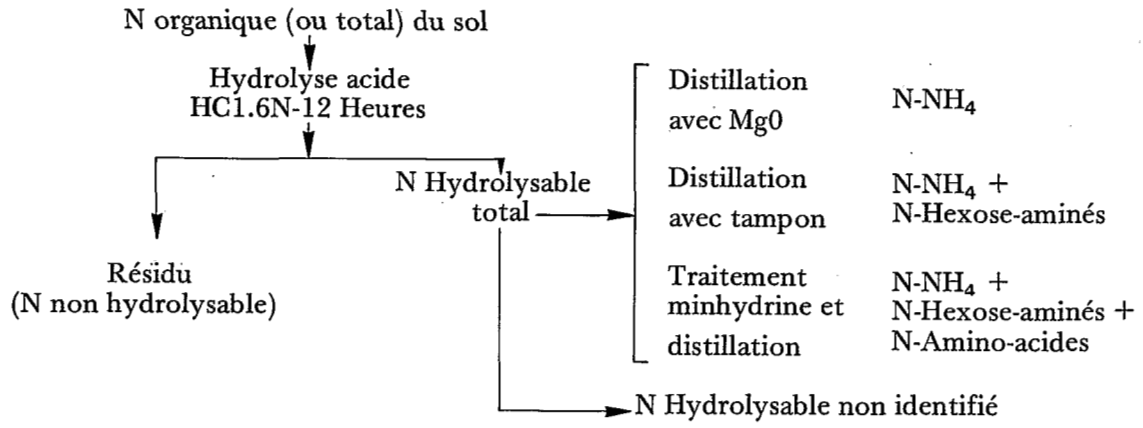
La détermination analytique la plus courante faite sur l'azote du sol est celle de l'azote total par la méthode bien connue de KJELDHAL : on détruit la matière organique du sol pendant plusieurs heures à chaud en milieu sulfurique concentré et on recueille ensuite l'ammoniac par distillation en milieu alcalin. L'agronome se contente habituellement de cette donnée qui, dans la plupart des cas, le renseigne suffisamment sur les disponibilités du sol en azote.

Ce n'est que lors d'études particulières que l'on se préoccupe de fractionner l'azote minéral en sols ferrallitiques ; en général, il s'agit du dosage de l'azote ammoniacal et l'azote nitrique assez souvent après extraction à KCl (CORNFORTH et WALMSLEY, 1971 ; BURDIN et EGOUMENIDES, 1973, etc.).

On s'est depuis longtemps préoccupé de la facilité avec laquelle l'azote peut se minéraliser à partir de la matière organique. D'où les tests de minéralisation à l'étuve du type de celui de BREMMER (1965) cité précédemment. Le principe de ces tests est extrêmement simple : on met à l'étuve à 28-30° un sol préalablement humidifié et, au bout de quelque temps, on mesure l'azote minéral apparu. Les variables entre les différents tests proposés concernent principalement le temps d'incubation, de quelques jours à trois semaines (2 semaines chez BREMMER), et le taux d'humidité qui peut aller jusqu'à 50 %, mais est habituellement voisin de la capacité sur champ.

Des tests voisins dans leur but, sinon dans leur conception, concernent la mesure de l'azote organique oxydé par une solution de permanganate ou encore celle de l'azote potentiellement assimilable basée sur le glucose extractible (JENKINSON, 1968). La méthode de HOYT (1967) paraît originale : comme la chlorophylle est facilement et rapidement décomposée, ce qui existe comme chlorophylle dans le sol indique la quantité de résidus frais, donc la réserve d'azote susceptible de se minéraliser très vite.

On s'est efforcé également, dans une optique agronomique (et non pas pour étudier pour elle-même la matière organique) de fractionner l'azote organique du sol afin de faire apparaître une fraction hydrolysable, donc en principe facilement minéralisable à court et moyen terme et un résidu résistant à l'hydrolyse. Il pourra s'agir d'une hydrolyse, alcaline (méthode de CORNFIELD citée par CORNFORTH et WALMSLEY, 1971) ou plus souvent, d'une hydrolyse acide du genre de celle de BREMMER (1965) qui est exposée page suivante d'après OLIVER et *al.* (1978).



On peut identifier par ce moyen, dans la fraction hydrolysable, l'azote contenu dans les acides aminés et celui fixé sur les sucres (hexoses). L'existence et l'importance des fractions hydrolysables non identifiées et non hydrolysables ne permettent de considérer cette méthode que comme un moyen de comparer les sols entre eux.

On pourrait évidemment utiliser toutes les méthodes de fractionnement de la matière organique pour caractériser l'azote du sol : il s'agit là d'un domaine extrêmement important déjà traité dans le tome IV de cette série et donc qui n'entre pas dans le cadre de cette étude.

Si l'on s'en tient aux méthodes analytiques mises en œuvre dans un but agronomique, on peut dire qu'une seule est largement et universellement utilisée, c'est *l'azote total Kjeldhal*. Elle est très simple à mettre en œuvre et en outre c'est, de façon générale, celle qui donne les meilleurs résultats pratiques (CORNFORTH et WALMSLEY, 1971, à propos de 155 unités de sols des Antilles anglophones, dont un bon nombre de ferrallitiques).

Quant aux autres méthodes, citées précédemment, elles ne sont guère employées que pour des recherches particulières ; et en ce qui concerne la pratique agricole de tous les jours en sols ferrallitiques (car en sols hydromorphes, par exemple, il peut être utile de mesurer l'azote nitrique), le moins que l'on puisse dire est qu'elles intéressent assez médiocrement l'agriculteur. Théoriquement, le test de l'azote facilement minéralisable à l'étuve — facile à mettre en œuvre — pourrait être une indication de la disponibilité pour les plantes de l'azote organique. Effectivement, grâce à des incubations répétées de 4 semaines, BERNHARD-REVERSAT (1976) a évalué la minéralisation annuelle de l'azote dans les dix centimètres supérieurs de deux sols couverts de forêt de Côte d'Ivoire : les taux de minéralisation seraient de 12,5 % par an en sols sableux sur sables tertiaires et de 6,2 % en sols nettement plus argileux sur schistes, ces deux sols étant tous les deux fortement désaturés. Le moins que l'on puisse dire est qu'ils diffèrent très fortement de ceux trouvés au Ghana voisin.

Si on en juge par les résultats d'un certain nombre d'auteurs, ces tests ne paraissent qu'assez mal correspondre avec ce qui se passe en réalité dans les sols. En ce domaine, la considération du rapport C/N (cf. chap. XI., p. 240) se révèle souvent suffisante et généralement plus sûre.

Une autre raison de la désaffection des chimistes des laboratoires de routine pour ces fractionnements de l'azote réside dans le fait que les formes de l'azote du sol se modifient assez fortement (1), quant à leurs proportions respectives, au cours du transport et du stockage (l'activité des micro-organismes en est évidemment responsable). De telle sorte que, sauf analyses faites immédiatement après le prélèvement ou précautions particulières très contraignantes (réfrigération, gel ou inhibition de l'activité des micro-organismes par le chlorure mercureux ou le formol, etc.), on n'est jamais sûr de mettre en évidence ce qui existait dans le sol au moment du prélèvement.

(1) Ces modifications concernent surtout la répartition des formes minérales entre elles.

2.3. TENEURS EN AZOTE DES SOLS FERRALLITIQUES

La quantité d'azote que contient un sol est évidemment fonction de sa teneur en matières organiques et de son degré d'évolution que l'on peut caractériser très grossièrement par le rapport C/N.

En Afrique Occidentale et Centrale, on considère que, sous végétation naturelle, les taux d'azote total de 0,5 à 2 °/oo par rapport au sol (tamisé à 2 mm) représentent une moyenne pour la majeure partie des sols ferrallitiques de cette région. Par contre, en Amérique Latine, des teneurs de 2 à 5 °/oo sont fréquentes. Naturellement, cet azote est concentré pour sa quasi-totalité dans la partie superficielle du sol (horisons humifères)

Parmi les facteurs qui conditionnent l'accumulation de l'azote organique dans le sol, il faut citer surtout la teneur en argile du sol et son pH. Ces questions ayant déjà été traitées dans le tome IV à propos de la matière organique, on n'en donnera ici qu'un bref résumé pour fixer les idées.

En ce qui concerne l'importance du facteur argile, il est prouvé qu'il existe une bonne corrélation entre azote du sol et taux d'argile (mesuré par granulométrie). Parmi les travaux les plus récents, on peut citer l'équation de régression établie par COINTEPAS et KAISER (1980) pour les sols à cotonnier de la République Centrafricaine.

$$N\ °/oo = 0{,}04\ \text{Argile}\ \% + 0{,}215 \qquad r = 0{,}76$$

Le pH, lorsqu'il est très acide (pH < 5,0), inhibe l'activité des bactéries spécifiques de la minéralisation de l'azote organique, d'où une accumulation de matières organiques mal décomposées dans les sols à réaction fortement acide (rapport C/N élevé, supérieur à 12). C'est une des raisons de la richesse en azote des sols ferrallitiques d'Amérique Latine, dont le pH est en moyenne plus bas que celui des sols correspondants d'Afrique (au nord de l'Equateur).

On peut ajouter tout de suite que la mise en valeur du sol par la culture engendre une baisse considérable des teneurs en azote. Mais il s'agit d'un problème qui sera traité à propos de la dynamique de l'azote (cf. chap. IX., p. 162-174).

La détermination complète des formes de l'azote sous l'aspect azote total d'un côté, azote ammoniacal, nitrites et nitrates de l'autre, ne se fait que rarement lors d'études spécifiques. La faiblesse quantitative des formes ammoniacale et nitrate (la forme nitrite ayant une existence extrêmement fugace dans les sols convenablement drainés), leurs évolutions, s'il y a transport et stockage un peu longs, en rendent les résultats d'une utilité douteuse pour la pratique agricole de tous les jours.

Par contre, il paraît intéressant d'exposer les résultats de la séparation des formes organiques entre elles. Ainsi, OLIVER et *al.* (1978) en étudiant par la technique de BREMMER (1965) la réorganisation des formes de l'azote dans un sol ferrallitique de Madagascar après une culture de ray-gras ont obtenu les chiffres suivants (sans apport de paille ou d'engrais azotés) :

N ammoniacal (NH_4)	4 ppm
N des hexose-aminés	211 ppm
N des amino-acides	250 ppm
N hydrolysable non identifié	288 ppm
N non hydrolysé (résidu)	157 ppm
TOTAL	910 ppm

On notera la faiblesse de l'azote ammoniacal et l'importance relative des fractions hydrolysables, donc, en principe, facilement accessibles aux bactéries de l'ammonification et de la nitrification (le N aminé ne paraît pas avoir été séparé malgré son importance quantitative).

Utilisant une technique similaire de fractionnement, COINTEPAS et KAISER (1980) ont remarqué que les formes de l'azote se répartissaient à peu près toujours suivant les mêmes pourcentages dans les sols cultivés en cotonniers de la République Centrafricaine, malgré des teneurs en azote total très variables (0,4 °/oo à 1,10 °/oo de N total).

Azote hydrolysable	
N Amidé et Ammoniacal	25 % du N total
N des acides aminés (y compris amino-sucres et certains non identifiés)	50 % du total (méthode simplifiée)
Azote non hydrolysable	25 % du N total.

Actuellement les études entreprises sur l'azote du sol tendent de plus en plus à associer les formes de l'azote aux fractions de l'humus, surtout pour rendre compte de l'aspect dynamique de l'évolution de l'azote du sol (DABIN, com. pers.).

TABLEAU VIII.1. — *Teneurs en azote et carbone d'un sol dérivé de basalte, sous végétation naturelle (« jungle ») en Malaisie, cité par* COULTER *(1972)*

Profondeur en cm	C %	N %	C/N
0-2,5	4,60	0,31	14,8
2,5-7,5	2,56	0,20	12,8
7,5-15	2,05	0,16	12,8
30-45	1,40	0,12	11,6
45-75	1,09	0,10	10,9
75-95	0,89	0,08	11,1
95-133	0,77	0,07	11,0

Teneur en azote total
Sol ferrallitique jaune fortement désaturé (Latossolo amarelo álico)
sous forêt équatoriale humide près de Manaus (Brésil)
d'après CAMARGO *et* RODRIGUEZ *(1979)*

Horizon	Profondeur en cm	C org %	N %	C/N
A_0	2-0 (lit.)	23,6	1,29	18
A_1	0-3	5,45	0,41	13
A_3	3-8	2,95	0,30	10
B_1	8-20	1,50	0,15	10
B_{21}	20-40	0,80	0,13	G
B_{22}	40-60	0,58	0,09	G

2.4. RECAPITULATION

Si l'on passe en revue les formes de l'azote telles qu'ont pu les déterminer les divers auteurs qui ont travaillé et sur la matière organique et sur l'azote du sol, il apparaît que la mesure de l'azote total donne des résultats indiscutables, cohérents et le plus souvent suffisants pour juger du potentiel azoté d'un sol comme on le verra au chapitre VII., p. 92-96.

Les méthodes faisant appel à l'azote minéralisé après incubation à l'étuve ou à l'azote obtenu après hydrolyse acide (et parfois alcaline) semblent actuellement réservées à des études faites pour des objectifs précis et bien particuliers et, pour l'instant, ces techniques ne débouchent pas sur des applications pratiques courantes. Il est probable toutefois que les expériences menées sur la réorganisation de l'azote dans le sol à la suite de certaines pratiques culturales (enfouissement de résidus de récolte — apport d'engrais) auront des conséquences pour l'agriculture, mais à une échéance qu'il paraît difficile de prévoir.

3. LES FORMES DU SOUFRE

Malgré les travaux de devanciers qui avaient décrit au Malawi une maladie du jaunissement du théier due à une carence en soufre (STOREY et LEACH, 1933), l'importance du soufre du sol pour la nutrition des plantes en pays tropicaux fut surtout mise en évidence par les études de GREENWOOD (1951 et 1954) sur l'arachide au Nigéria du Nord et retrouvée ensuite à de multiples occasions sur les sols ferrallitiques par d'autres chercheurs.

3.1. FORMES DU SOUFRE DANS LES SOLS

Comme pour l'azote, on définit :

— un soufre organique : c'est principalement le soufre d'un certain nombre d'acides aminés contenus dans la matière organique du sol : cistéïne, cistine, méthionine, taurine, etc. Cette forme de soufre est normalement inassimilable par les plantes (FEILINGER et *al.*, 1972).

— un soufre minéral soluble représenté surtout par des sulfates, forme d'alimentation essentielle de la plante. Certains auteurs néozélandais pensent que le végétal pourrait aussi s'alimenter à partir de soufre fixé sur les oxydes de fer sous forme de sulfate et peut-être de sulfures.

D'autres formes minérales peuvent exister dans le sol mais à l'état de traces : soufre élémentaire, thiosulfates, sulfites ; elles évoluent très vite vers les sulfates ou les acides aminés (à noter que les sulfures ne sont abondants que dans les horizons hydromorphes).

Si les plantes sont capables, de par leur physiologie, d'absorber l'anhydride sulfureux de l'air, cette alimentation ne peut revêtir une certaine importance que dans des atmosphères particulièrement chargées en gaz sulfureux (rues des villes, proximité d'usines, zone de volcanisme).

3.2. METHODES D'ANALYSE (1)

Dans la plupart des cas, on dose le soufre total après extraction par un mélange d'acide nitrique et de nitrate de potassium. Quant au soufre sous forme de sulfates, on le déplace par agitation dans une solution de phosphate monocalcique ou monopotassique.

Le soufre organique est habituellement déterminé par différence entre soufre total et soufre minéral (sulfates), mais il est possible de le doser directement après élimination préalable des sulfates (méthode de BARDSLEY et LANCASTER, citée par DABIN, 1970-b).

3.3. TENEURS EN SOUFRE DES SOLS FERRALLITIQUES

Les sols ferrallitiques ont en moyenne de 100 à 400 ppm de soufre sotal, au moins en surface. Le soufre étant contenu pour les neuf dixièmes dans la matière organique, il est logique de constater que les horizons les plus riches en soufre sont les horizons humifères

(1) Pour les méthodes d'analyse du soufre dans les sols, on consultera notamment : JOHNSON et NISHITA (1952), ESMINGER (1954), CHAUDRY et CORNFIELD (1966), ESMINGER et FRENEY (1966), DABIN (1970-b), TIEDEMAN et ANDERSON (1971), etc.

(ce sont ceux qui contiennent en moyenne entre 100 et 400 ppm de soufre) ; les teneurs en cet élément diminueront avec la profondeur parallèlement à celles de la matière organique.

On peut estimer grossièrement le soufre des sulfates à un dixième de la valeur du soufre total (DABIN, 1970-b ; GRANT et SHAXSON, 1970), proportion analogue à celle que l'on trouve dans les sols tempérés (BETTANY et *al.*, 1973). BITTENCOURT et *al.* (1978) trouvent que les sols de l'état de São Paulo au Brésil contiennent entre 13 et 25 ppm de soufre sous forme de sulfate.

Cette proportion du dixième est tout au moins ce que l'on peut observer dans les sols cultivés, les sols de savane et même les sols forestiers lorsque la végétation n'est pas trop « gourmande ». Le tableau VIII.2. indique en effet que, sous forêt humide en Ouganda, les sulfates ont disparu probablement absorbés au fur et à mesure de leur formation par les racines. La situation est un peu différente sous repeuplement forestier au Kenya : on commence à trouver des sulfates à partir de 30 centimètres, et ils ont dû être beaucoup plus abondants à certaines périodes de l'année, car leur accumulation à partir de deux mètres de profondeur laisse supposer un entraînement par les eaux de drainage. Sauf exception, l'absence de sulfates dans les horizons superficiels n'implique pas spécialement une mauvaise minéralisation de la matière organique ; il faut plutôt penser à une forte consommation instantanée par les plantes. D'où l'intérêt de baser les échelles de fertilité du soufre plus sur le soufre total que sur les sulfates pourtant seuls assimilables.

TABLEAU VIII.2. — *Répartition des formes du soufre dans deux sols forestiers d'Afrique Orientale d'après HESSE (1957)*

Ouganda forêt naturelle humide			Kenya plantation forestière d'acacia Wattle			
Prof. cm	S des sulfates : ppm	S organique : ppm	Prof. cm	S des sulfates : ppm	S organique : ppm	S total ppm
			Litière	10	460	470
0-2,5	0	230	0-5	0	750	750
2,5-7,5	0	270	5-30	0	430	430
7,5-15	0	170	30-90	4	360	364
15-60	0	60	90-180	27	40	67
60-98	0	0	180-240	56	45	101
			240-270	126	25	151

TABLEAU VIII.3. — *Teneurs en soufre, carbone et azote total de quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire d'après DABIN (1970-b)*

			Soufre total °/oo	C °/oo	N °/oo
Sols moyennement désaturés remaniés sur granite	Lakota	Surface	0,100	33,8	2,6
		Profondeur	0,045	6,7	0,64
	Gagnoa	Surface	0,116	18,9	1,66
		Profondeur	0,079	4,2	0,48
Sols faiblement désaturés typique sur roches basiques	Grok	Surface	0,052	21,4	2,14

4. LE PHOSPHORE

4.1. GENERALITES

La détermination des formes du phosphore dans les sols des régions intertropicales, et en particulier dans les sols ferrallitiques, est peut-être l'un des problèmes les plus irritants auxquels se sont heurtés, et se heurtent encore, chimistes du sol, pédologues et agronomes.

Relier entre eux les besoins des plantes en phosphore et les quantités de cet élément extraites du sol par une technique analytique donnée s'est révélé une entreprise difficile qui n'a pas, jusqu'à ce jour, reçu de solution tout à fait satisfaisante.

Il ne peut être question de passer en revue les très nombreuses méthodes de dosage du phosphore. Aussi, se bornera-t-on à classer les plus importantes, de façon à mettre en relief les principales conceptions qui se sont progressivement dégagées depuis une trentaine d'années :

— le phosphore total,

— le phosphore assimilable,

— le phosphore extrait par des méthodes physiques : eau et résines échangeuses d'anions,

— le fractionnement du phosphore du sol,

— le phosphore labile isotopiquement diluable,

— les méthodes issues d'une approche dynamique : potentiel phosphorique et facteurs de Larsen.

Ces méthodes ne sont pas exclusives les unes des autres : c'est ainsi que l'étude des facteurs de Larsen peut faire intervenir plusieurs des méthodes envisagées dans les paragraphes précédents.

4.2. PHOSPHORE TOTAL

Il s'agit par définition de l'intégralité du phosphore présent dans le sol, y compris celui qui est contenu dans les minéraux non encore altérés et les concrétions : on ne peut le déterminer avec rigueur qu'après des attaques énergiques du type fusion alcaline ou attaque fluorhydrique ou fluoperchlorique.

Bien souvent, on se contente de faire agir à chaud des mélanges d'acides forts, soit les « Trois acides » (nitrique, sulfurique, chlorhydrique) (CLAISSE, 1968), soit le mélange nitro-perchlorique (JACKSON, 1962) ; on obtient la quasi-intégralité du phosphore du sol, bien qu'on ne détruise pas en totalité tous les minéraux primaires et secondaires du sol.

Ces techniques sont jugées longues, coûteuses et parfois dangereuses. Aussi les agronomes de divers pays ont-ils cherché des tests permettant d'évaluer rapidement une part significative des réserves phosphoriques du sol, qu'ils ont souvent baptisées improprement « Phosphore total ». C'est ainsi qu'en pays francophones, on attaque le sol par l'acide nitrique concentré et bouillant pendant cinq heures ; les quantités de phosphore extraites sont un peu inférieures à celles obtenues par fusion alcaline (certaines concrétions sont malaisées à attaquer), mais tout de même importantes : 170 à 1.200 ppm dans les sols ferrallitiques sur grès et granite gneissique de l'Afrique de l'Ouest, jusqu'à 3.000 ppm dans les sols sur basalte de la Réunion (BOUYER, 1971). On a employé au Brésil une méthode similaire mais en utilisant de l'acide nitrique à 20 % (PAVAGEAU, 1951) ; le phosphore ainsi obtenu est évidemment inférieur en quantité à celui de la méthode française.

Parmi les nombreuses variantes, on peut citer celle utilisée assez souvent en pays tropicaux anglophones, qui fait agir de l'acide chlorhydrique 6 N sur un sol préalablement calciné : sur les sols de Malaysia, par exemple, on ne dépasse guère 250 ppm de phosphore, sauf sur les sols dérivés de basalte où on peut atteindre 2.000 ppm (COULTER, 1972).

Ces tests ont rendu un certain nombre de services pour apprécier la fertilité phosphorique des sols (BERGER, 1964 ; LATHAM, 1969 ; MOULINIER, 1962 en Côte d'Ivoire, par exemple), mais on peut leur reprocher d'être trop « ponctuels » ; extrayant en bloc le phosphore, ils incluent celui qui est difficilement assimilable par les plantes. Aussi ne sont-ils valables que sur un type de sol donné et sous un climat donné et les échelles de fertilité qu'on peut établir ne sont généralement pas applicables à d'autres régions et d'autres sols.

4.3. PHOSPHORE ASSIMILABLE

Par définition, le phosphore assimilable est la fraction du phosphore total accessible aux plantes. La grosse difficulté est évidemment de trouver un procédé analytique qui rendra bien compte des quantités effectivement prélevées par les cultures. D'où différentes approches :

Le phosphore acido-soluble par extraction aux acides faibles

Les agronomes travaillant sous les tropiques ont d'abord importé en milieu ferrallitique les méthodes de détermination du phosphore assimilable qui avaient fait leur preuve dans les pays tempérés et qu'ils ont progressivement améliorées.

— La méthode de TRUOG (TRUOG, 1930) : extraction à H_2SO_4 . 0,002 N tamponné à pH 3 ; elle fut très utilisée dans les pays tropicaux d'Afrique et d'Asie : elle est en voie d'abandon pour les analyses de routine, l'expérience ayant montré qu'elle avait peu d'intérêt.

— La méthode BONDORFF (BONDORFF, 1952) : extraction à H_2SO_4 . 0,3 N basée sur le même principe a été, par contre, beaucoup moins employée.

— La méthode de la North Carolina University (1), elle, est toujours largement utilisée en Amérique latine ; elle utilise comme solution d'extraction un mélange d'acides chlorydrique et sulfurique étendus (HCl . 0,05 N + H_2SO_4 . 0,025 N) (VETTORI, 1969).

— La méthode de BRAY (BRAY et KURTZ, 1945) : elle combine l'extraction du phosphore en milieu acide à la complexation, par le fluorure d'ammonium, de l'aluminium lié au phosphore ; le réactif d'extraction fut modifié trois fois dans le sens de la concentration.

BRAY N° 1	0,3 N	NH_4F + 0,025 NHCl
BRAY N° 2	0,3 N	NH_4F + 0,1 N HCl
BRAY N° 3	0,5 N	NH_4F + 0,1 N HCl

Les réactifs de BRAY sont très utilisés dans les pays anglophones d'Asie et d'Afrique ainsi qu'en Amérique latine.

— La méthode DYER (DYER, 1894), utilise comme solution d'extration l'acide citrique à 1 % qui, comme le réactif de BRAY, a certaines propriétés complexantes, vis-à-vis du fer cette fois. Elle fut employée de façon systématique pendant un certain temps dans les pays francophones d'Afrique ; on l'utilise encore dans le cas de sols déjà enrichis par des engrais phosphatés (GODEFROY, 1974). Les valeurs trouvées s'échelonnent de 0 ppm (sols sans engrais) à 200 ppm (sols fortement enrichis) en bananeraie.

(1) Cette méthode semble très voisine de celle exposée par NELSON, MEHLICH et WINTERS (1953).

— Un certain nombre d'autres méthodes furent utilisées épisodiquement sur des sols ferrallitiques ; ce sont surtout les méthodes de WARREN et COOKE (1965) avec HCl à 0,3 N (phosphore extractible de LE MARE, 1952, en Tanzanie), de WILLIAMS et STEWART (1941) avec l'acide acétique, de MORGAN (1937) avec un mélange acide acétique - acétate de Na, d'EGNER, RIEHM et DOMINGO (1960) avec un mélange lactate d'ammonium - acétate d'ammonium (méthode utilisée par ROBINSON (1968) sur les sols du Tanganika), JORET et HEBERT (1955), avec l'oxalate d'ammonium. Le moins qu'on puisse dire de toutes ces méthodes est qu'elles ne sont pas généralisées et qu'elles ne le seront sans doute jamais pour les sols ferrallitiques.

D'un strict point de vue analytique, le phosphore acido-soluble ne paraît exister qu'en quantité faible dans les sols ferrallitiques et est d'autant plus faible que les sols sont plus acides : par exemple, les chiffres trouvés vont de 0 à 20 ppm, rarement plus, de phosphore assimilable, avec une forte proportion de sols où elle ne dépasse pas 12 ppm (FORESTIER, 1960, avec TRUOG en République Centrafricaine ; WESSEL, 1971, avec BRAY N° 1 en Nigéria ; FALESI, 1972, avec North Carolina en Amazonie, entre autres auteurs). D'où des difficultés d'analyse et aussi d'interprétation des résultats avec une gamme de valeurs aussi restreinte.

En outre, on verra plus loin que le phosphore acido-soluble n'est pas toujours représentatif du phosphore utilisable par les plantes, surtout lorsque les sols sont acides. C'est en particulier l'opinion de BOWER (com. pers.) à propos de l'utilisation des réactifs de BRAY sur les sols du Sud-Est asiatique. Pourtant ROCHE et *al.* (1978) trouvent des corrélations assez satisfaisantes entre le phosphore extrait par BRAY N° 2 dans les sols ferrallitiques et l'alimentation phosphorique de cultures en pot.

Le phosphore alcalino-soluble

Afin de tenir compte du fait que le phosphore des sols ferrallitiques se trouve en grande partie sous forme complexée avec le fer et l'alumine, forme inattaquable par les acides faibles, quelques auteurs ont tenté l'extraction par les bases faibles.

Ce sont surtout les méthodes d'OLSEN et *al.* (1954) et de SAUNDER (1956) qui utilisent comme réactifs d'extraction le bicarbonate de soude semi-molaire dans le premier cas et la soude diluée 0,1 N à chaud dans le second. DALLAL (1973) a réalisé une combinaison de ces deux réactifs en employant comme solution d'extraction 0,25 M.NaOH + 0,1 M.Na_2CO_3.

La méthode de SAUNDER a été assez largement utilisée en Afrique Orientale (SAUNDER, 1966 ; JENKINS, 1966), ainsi qu'en Afrique francophone et à Madagascar. Elle semble actuellement, sinon en voie d'abandon, du moins un peu délaissée.

Par contre, la méthode d'OLSEN semble recueillir les faveurs d'un nombre grandissant de chimistes du sol (VAN RAIJ, 1978).

Les quantités de phosphore alcalino-soluble extraites des sols ferrallitiques par ces méthodes sont nettement plus élevées en général que le phosphore acido-soluble.

4.4. PROCEDES DE FRACTIONNEMENT DU PHOSPHORE DU SOL

Dans les sols ferrallitiques, généralement acides et abondamment pourvus en fer et alumine, le phosphore se présente souvent en combinaison avec ces deux corps (au lieu d'être en majeure partie associé au calcium comme cela se passe dans les sols tempérés souvent alcalins, neutres ou faiblement acides). En outre, le phosphore soluble y est en quantité insignifiante dans la majorité des cas.

Malgré les travaux de certains devanciers (VALENTE-ALMEIDA et *al.*, 1954 en Angola, BATES et BAKER, 1960 au Nigéria), c'est à CHANG et JACKSON (1957) que revient le mérite d'avoir débrouillé cette question des formes du phosphore, méthode depuis largement appliquée aux sols tropicaux et aux sols ferrallitiques en particulier.

La méthode de CHANG et JACKSON (1957)

En utilisant successivement sur le même sol un certain nombre de réactifs NH_4 Cl (pH 7,0), NH_4F 0,5 N, Na OH 0,1 N, SO_4 H_2 0,5 N, citrate de Na et hydrosulfite de Na, Na OH 0,1 N, on extrait dans l'ordre :

Phosphore soluble ou facilement solubilisé, en abrégé		P — soluble
Phosphore lié à l'alumine	" "	P — Al
Phosphore lié au fer	" "	P — Fe
Phosphore lié au calcium	" "	P — Ca
Phosphore d'inclusion lié au fer	" "	P — Fe occlus
Phosphore d'inclusion lié à l'alumine	" "	P — Al occlus

Phosphore organique : généralement mesuré par différence entre le phosphore total et la somme des 6 premières formes mais on peut aussi le déterminer directement (Méthodes MEHTA et *al.*, 1954, et de EID et *al.*, 1954).

D'autre part CHANG, CHU et ERH (1966) ont défini un phosphore réductible, qui semble être la partie du phosphore d'inclusion extractible sous l'action d'un réducteur, ici le dithionite-citrate-bicarbonate.

On considère habituellement (CHANG et CHU, 1961 ; DABIN, 1963) que le phosphore soluble, le phosphore lié au calcium et le phosphore lié à l'aluminium sont absorbés préférentiellement par la plante dans cet ordre. Quant au phosphore lié au fer, il semble qu'il faille faire une distinction entre celui qui est lié au fer amorphe, qui serait assimilable dans une certaine mesure, et les composés phosphore - oxydes de fer cristallisés, gœthite principalement, inaccessibles aux plantes aux pH acides ; par contre en cas de relèvement du pH, ces composés deviendraient instables et formeraient donc des réserves potentielles de phosphore dans les sols amenés au voisinage de la neutralité. Le phosphore d'inclusion est le plus souvent considéré comme inutilisable ; pourtant des travaux récents lui donneraient un rôle de réserve lentement mobilisable à long terme, en particulier à la suite de complexation par la matière organique (DABIN, 1972). Quant au phosphore organique, il ne peut guère être absorbé par les racines que lors de la minéralisation de la matière organique.

La séparation entre ces fractions n'est probablement pas aussi absolue que semble l'indiquer l'énumération des formes citées plus haut : on pense en particulier que la méthode de CHANG et JACKSON inclut dans le phosphore lié à l'alumine au moins une partie de phosphore lié au fer (FIFE, 1959 ; SMITH, 1965) et qu'elle surestime le phosphore d'inclusion par rapport au phosphore plus faiblement lié au fer et à l'aluminium P-Fe et P-Al (RAJENDRAN et SUTTON, 1970 ; WILLIAM et WALTER, 1969).

Il est probable, aussi, qu'en même temps que le phosphore lié à l'alumine, on extrait un peu de phosphore organique étant donné la nature du réactif d'extraction.

D'après CONESSA (cité par PICHOT et ROCHE, 1972), le phosphore lié au calcium est partiellement extrait par le chlorure d'ammonium (P soluble en principe), le phosphore lié à l'aluminium se retrouve pour une part dans le phosphore lié au fer. De fait les catégories définies par CHANG et JACKSON sont trop simplistes pour rendre compte de la complexité des formes du phosphore dans le sol.

Malgré ces défauts, et il faut bien le dire ces limitations, la méthode de CHANG et JACKSON a le grand mérite de donner un moyen de séparer les sols en grandes familles dont l'expérience montre qu'elles ont à peu près les mêmes propriétés pour le phosphore et dont les tendances d'évolution du phosphore incorporé sont semblables.

On peut en tout cas en tirer la conclusion qu'il est incorrect de parler de phosphate de fer ou d'aluminium comme le font certains auteurs anglo-saxons, car il s'agit dans le sol de complexes dont probablement la seule parenté avec les phosphates est de comprendre dans leurs formules chimiques, fort mal connues d'ailleurs, du phosphore et un cation métallique.

Bien que WESSEL (1971) à propos des sols à cacaoyers du Nigéria, veuille voir supprimer les dénominations « Al phosphate », « Fe phosphate », « Fe bound P », « Al bound P », etc.,

on continuera pour la commodité de l'expression à utiliser les dénominations de CHANG et JACKSON, tout en ayant présent à l'esprit ce qu'elles peuvent avoir de relatif.

La méthode dite de Bondy ou OLSEN modifiée DABIN (DABIN, 1967)

Si les formes du phosphore définies par CHANG et JACKSON (op. cit.) donnent une bonne idée des diverses fractions du phosphore du sol, les processus analytiques sont longs et délicats à mettre en œuvre ; d'où la méthode dite de Bondy dérivée de celle de CHANG et JACKSON et d'OLSEN, mise au point dans les laboratoires de l'ORSTOM. Elle consiste essentiellement à attaquer le sol en une fois par un mélange de carbonate de soude et de fluorure d'ammonium à pH 8,5.

On extrait par ce moyen la totalité du phosphore soluble et du phosphore lié au calcium et à l'aluminium, une partie du phosphore liée au fer (probablement la fraction la moins fortement complexée) et certainement aussi un peu de phosphore organique ; l'ensemble représente, somme toute, les formes de phosphore que l'on considère habituellement comme assimilables par les plantes (sauf la fraction organique qui n'est utilisable qu'à terme).

Cette méthode semble donner satisfaction en Afrique noire, à Madagascar et au Brésil.

Elle a l'avantage de présenter un large éventail de valeurs suivant la richesse des sols en phosphore : en moyenne de 20 à 30 ppm de P pour les sols pauvres, jusqu'à 500 ppm pour les sols les plus riches. En outre elle apparaît valable pour une importante gamme de pH du sol (pH 3,5 à pH 7,5). Elle serait toutefois de valeur un peu inférieure aux méthodes isotopiques pour exprimer les corrélations entre résultats analytiques et prélèvements par les plantes (LE BUANEC, 1973 ; PICHOT et *al.*, 1973). Elle a pour elle sa grande simplicité et une certaine supériorité sur les autres méthodes chimiques qui s'efforcent de mesurer un phosphore assimilable du sol. Toutefois PICHOT et *al.* (1973), TRUONG et *al.* (1973) lui préfèrent la méthode SAUNDER, au moins dans les sols de République Centrafricaine et de Madagascar sur lesquels ils ont travaillé.

Tout en confirmant que la valeur L de LARSEN (ainsi que le pouvoir fixateur de GACHON (1966) qui en dérive) est la mieux adaptée pour rendre compte de la fertilité des sols des pays tropicaux, y compris les sols ferrallitiques, ROCHE et *al.* (1978) pensent que la méthode Bondy donne de bons résultats dans les sols à très fort pouvoir fixateur et fortes teneurs en aluminium extractible. Les teneurs en phosphore assimilable Bondy (méthode OLSEN modifiée DABIN) sont beaucoup plus proches des valeurs L et E (isotopiques) que celles obtenues par la méthode SAUNDER qui, en fait, rend compte d'un « phosphore semi-total ».

Les valeurs des différentes formes du phosphore du sol d'après la méthode de CHANG et JACKSON

En consultant les tableaux VIII.4. et VIII.5., on peut se rendre compte qu'un certain nombre de particularités caractérisent le phosphore des sols ferrallitiques.

— Le phosphore réputé inassimilable, phosphore organique et phosphore occlus, est abondant, très abondant parfois ; si les proportions de phosphore peuvent varier énormément d'un sol à l'autre, celle du phosphore organique atteint au minimum 20 %, souvent plus de 50 %, dans les horizons humifères non enrichis artificiellement et on verra plus loin que, malgré les avatars qu'un sol puisse subir, cette proportion reste très stable.

— Le phosphore lié au fer s'accroît proportionnellement très vite lorsque le pH du sol s'abaisse ; inversement c'est lorsque le pH atteint et dépasse pH 6 que le phosphate lié à l'aluminium et le phosphate lié au calcium (considérés comme facilement assimilables) deviennent prépondérants par rapport au phosphore lié au fer.

— Le phosphore lié au calcium et surtout le phosphore soluble n'acquièrent une certaine importance que lorsque le pH est voisin de la neutralité.

TABLEAU VIII.4. — *Formes du phosphore dans la partie superficielle de divers sols ferrallitiques*

1) Horizons A et A_3 des séries de sols ferrallitiques du Sud-Est de l'Etat de Bahia (Brésil) d'après CABALA et FASSBENDER (1970)

	P sol ppm	P-Al ppm	P-Fe ppm	P-Ca ppm	P réductible ppm	P occlus ppm	P inorg. total ppm	P tot. ppm	P org. ppm	P Organique %
Cepec A_1	8	85	217	244	650	362	1 558	3 306	1 748	52
(Alfisol) A_3	0	87	139	169	554	464	1 413	3 050	1 637	54
Itabuna A_1	0	3	29	19	90	22	163	360	197	55
(Alfisol) A_3	0	0	25	9	64	24	122	270	148	55
Nazare A_1	0	0	21	4	103	11	139	257	118	46
(Ultisol) A_3	0	0	18	2	77	14	111	122	11	9
Valenca A_1	0	0	5	14	163	18	200	514	314	61
(Oxisol) A_3	0	0	4	9	196	28	237	307	70	23

NB. La correspondance indiquée ci-dessus entre les séries de la nomenclature brésilienne et les ordres de la classificiation américaine permet de classer approximativement les séries Cepec et Itabuna dans les ferrallitiques faiblement (Cepec) et moyennement (Itabuna) désaturés et les autres séries dans les ferrallitiques fortement désaturés.

A noter que les sols de la série Cepec sont quasi neutres en surface (pH de 6,5 à 7), ce qui explique la présence de phosphore soluble.

2) Horizons superficiel 0-15 cm de divers sols de cacaoyères dans le sud du Nigéria, d'après WESSEL (1971)

Argile %	C %	pH	P capacité de Sorbtion ppm	P assimil. Bray N° 1 ppm	P minéral ppm d'inclusion NH_4Cl-P (soluble) ppm	NH_4F-P (P-A1) ppm	NaOH-P (P-Fe) ppm	SO_4H_2-P P Ca ppm	Total part. ppm	P d'inclusion ppm	P org. ppm	P total ppm
24	1,84	5,4	6,5	2	1	2	22	6	31	223	202	456
18	1,68	6,2	57	4	0	4	22	8	223	140	202	375
14	1,33	6,1	21	4	0	4	14	7	25	34	130	189
13	1,29	6,2	22	4	0	6	13	10	29	139	194	362
28	1,76	5,8	64	5	0	3	25	8	36	180	274	490
26	1,90	5,6	62	3	1	8	32	15	56	249	226	531
16	1,33	6,3	35	6	1	9	28	9	47	193	166	406
25	1,92	5,5	53	6	2	7	36	8	57	224	223	500
21	2,20	6,3	37	6	1	8	33	17	59	183	262	504
18	1,66	6,0	40	7	1	9	29	10	49	122	235	406
17	2,02	5,7	43	7	1	11	20	12	44	124	207	375
18	2,44	6,2	32	23	1	22	57	40	120	86	304	510
26	2,66	6,4	34	34	4	23	52	56	145	185	420	750
22	2,48	6,9	23	40	13	74	75	165	327	295	316	938

3) Horizon de surface de sols ferrallitiques d'Afrique francophone d'après BOUYER et DAMOUR (1964)

Origine des sols	Quelques caractéristiques de ces sols	pH	P-Al ppm	P-Fe ppm	P-Ca ppm	P-Al inclusions ppm	P-Fe inclusions ppm
Konkouré-Guinée	Sol fortement ferrallitique sur schiste doléritique	4,9	24	38	15	14	157
Konkouré-Guinée	Sol faiblement ferrallitique sur schiste	4,9	22	24	11	21	126
Konkouré-Guinée	Sol faiblement ferrallitique sur grès	4,2	20	17	8	15	97
Sud Togo	Sol faiblement ferrallitique fertilisé (terre de Barre)	4,9	171	78	11	2	60
Sud Togo	Sol faiblement ferrallitique jachère récente (terre de Barre)	4,8	6	1	5	2	15
Niaouli-Dahomey	Sol faiblement ferrallitique épuisé (terre de Barre)	5,2	16	15	10	9	70
Adamaoua-Cameroun	Sol ferrallitique brun sur scories volcaniques quaternaires	5,9	214	315	74	57	270
Bambari-République Centrafricaine	Sol ferrallitique typique, sur schiste quartzeux	5,1	14	35	13	11	300

TABLEAU VIII.5. — *Distribution des formes du phosphore dans plusieurs profils de sols ferrallitiques*

1) Trois profils de Cacaoyères du « Cocoa Belt » du Nigéria d'après WESSEL (1971)

	Prof. cm	pH	C %	Argile %	P minéral non d'inclusion NH_4Cl-P (soluble) ppm	NH_4F-P (P-Al) ppm	NaOH-P (P-Fe) ppm	SO_4H_2-P (P-Ca) ppm	Total partiel ppm	P occlus ppm	P org. ppm	P tot. ppm
RICKET	0-7,5	6,4	1,8	29	1	8	33	12	54	247	299	600
(roche mère	7,5-30	5,8	0,6	30	0	3	23	9	35	163	127	325
gneiss à	30-80	5,7	0,2	44	0	1	16	7	24	183	93	300
biotite à	80-108	5,7	—	41	0	1	16	6	23	181	86	290
grains fins)	108-135	5,6	—	42	0	2	19	6	27	173	110	310
	135-175	5,5	—	46	0	1	17	4	22	181	57	260
IKOLE	0-10	6,3	2,8	18	1	57	73	37	168	168	377	713
(roche mère	10-35	6,0	0,8	13	0	23	75	19	117	212	146	475
gneiss à	35-60	5,5	0,4	40	0	9	48	12	69	240	101	410
composition	60-150	5,2	—	47	0	4	25	7	36	148	81	265
de diorite												
IKORODU	0-10	5,6	1,5	11	0	15	20	10	45	15	230	290
(roche mère	10-20	5,6	0,5	9	0	7	16	8	31	20	109	160
sables	20-35	5,0	0,4	15	0	1	15	4	20	68	92	180
tertiaires)	35-65	4,5	—	40	0	1	17	6	24	271	120	415
sol pauvre	65-112	4,5	—	42	0	1	20	20	26	266	118	410

2) Profil d'un sol ferrallitique fortement désaturé du Sud-Est de l'état de Bahia (Brésil) d'après CABALA et FASSBENDER (1970)

		P-sol ppm	P-Al ppm	P-Fe ppm	P-Ca ppm	P réductible ppm	P occlus ppm	P inorg. total ppm	P total ppm	dont P inorganique ppm	P org. %
Colonia (oxisol)	A_{11}	0	5	11	3	10	4	33	90	57	63
	A_{12}	0	0	12	3	0	5	20	140	120	86
	B_1	0	0	11	3	10	6	30	81	51	63
	B_2	0	0	18	4	25	9	53	158	105	66
	B_3	0	0	18	7	76	8	109	127	18	14

4.5. PHOSPHORE EXTRAIT A L'EAU ET PAR LES RESINES ECHANGEUSES D'ANIONS

Phosphore extrait à l'eau

Les méthodes d'extraction du phosphore à l'eau paraissent dériver de celle de WATANABE et OLSEN (1965) ; on s'efforce par ce moyen de retirer du sol le phosphore en solution et celui qui est susceptible de s'y solubiliser très rapidement. Il s'agit donc d'un phosphore immédiatement utilisable par la plante. Ce procédé a théoriquement l'avantage d'intégrer les facteurs intensité et capacité de LARSEN selon PAAW (1971). Toutefois, ROCHE et *al.* (1978) pensent qu'il ne peut mesurer que le facteur quantité.

Cette méthode a donné d'assez bons résultats au Ghana (OTENG et ACQUAYE, 1971), ainsi qu'aux Hawaï (RAJAN, 1973). Pourtant, elle ne s'est pas généralisée en milieu ferrallitique. Sans doute faut-il incriminer la faiblesse des quantités de phosphore mises en jeu, de l'ordre de 0,05 milligramme par litre de solution, parfois moins (BOUYER, 1971), fort difficiles à doser par les procédés ordinaires ; ces faibles teneurs ont provoqué la mise au point de techniques de micro-dosages pour le phosphore (BHAT et BOUYER, 1968). L'emploi d'isotopes radioactifs devrait permettre de surmonter ce handicap (FARDEAU et GUIRAUD, 1974).

Toutefois, des tests réalisés sur de nombreux sols tropicaux et en particulier ferrallitiques ne paraissent pas avoir donné de résultats satisfaisants (ROCHE et *al.*, 1978). Cette déception tient sans doute au fait qu'il existe une autre limitation, d'ordre fondamental cette fois : le phosphore extractible à l'eau interfère avec la capacité de sorption du sol pour le phosphore ; aussi RAJAN (op. cit.) considère-t-il que cette mesure n'est valable que pour comparer des sols ayant le même pouvoir tampon pour le phosphore.

Phosphore extrait par les résines échangeuses d'anions

Une méthode d'extraction du phosphore du sol consiste en l'utilisation de résines échangeuses d'anions (AMER et *al.*, 1955).

Utilisé avec un certain succès aux Antilles (WALMSLEY et CORNFORTH, 1973), ce procédé ne paraît pas s'être généralisé pour les sols des pays tropicaux. Actuellement, il sert surtout à mesurer le facteur vitesse de LARSEN (DALLAL et HALLSWORTH, 1976, pour les sols d'Australie ; ROCHE et *al.* (1978) pour nombre de sols des régions intertropicales).

Dans une étude critique des diverses méthodes de mesure du phosphore du sol, VAN RAIJ (1978) considère que l'extraction par des résines échangeuses d'ions est l'un des meilleurs moyens d'évaluer correctement le phosphore utilisable par les plantes dans les sols du Brésil.

4.6. PHOSPHORE LABILE ISOTOPIQUEMENT DILUABLE

L'emploi des isotopes radioactifs a permis de donner une nouvelle impulsion à l'étude du phosphore labile, c'est-à-dire à l'ensemble des ions phosphates disponibles pour l'alimentation des plantes.

Parmi les méthodes proposées, la plus utilisée et la plus connue est celle de la détermination de la valeur L de LARSEN (1952). Après avoir marqué par du phosphore radioactif 32 P un engrais phosphorique, on le mélange à la terre d'un vase de végétation et on mesure la radioactivité spécifique (1) des plantes cultivées que l'on compare à la radioactivité spécifique du phosphore apporté au sol, au moyen de la formule :

$$L = (\frac{Cx}{Cp} - 1)\ X$$

où Cx est la radioactivité spécifique du phosphore apporté au sol,
Cp la radioactivité spécifique du phosphore prélevé par les plantes,
X la quantité de phosphore apporté au sol.

En sol carencé en phosphore, la plante s'alimente surtout à partir de l'engrais radioactif : le rapport $\frac{Cx}{Cp}$ tend vers 1 et la valeur L sera faible, voisine de zéro en cas de très forte carence ; en sol riche en phosphore, la plante s'alimente surtout à partir du phosphore préexistant dans le sol : $\frac{Cx}{Cp}$ prend des valeurs élevées, ainsi que L.

D'autres méthodes, assez voisines dans leur principe, sont également utilisées. Les plus connues mesurent la valeur A de FRIED et DEAN (1952) ou E de SCOTT RUSSEL et *al.* (1954). Quant à savoir si ces diverses valeurs, L, A et E, sont différentes ou identiques, les auteurs consultés avancent des opinions divergentes ; c'est ainsi qu'en comparant L et A, les uns concluent à une différence entre les deux (BLANCHET et *al.*, 1965), les autres à une identité absolue (TERMAN, 1968) ou encore à une identité relative aux conditions expérimentales près (FARDEAU et GUIRAUD, 1972).

Quoiqu'il en soit, c'est la valeur L de LARSEN qui est la plus souvent utilisée. Beaucoup d'auteurs s'accordent à trouver qu'en milieu ferrallitique, la valeur L donne, avec les prélèvements des plantes cultivées, des corrélations un peu supérieures à celles obtenues entre ces prélèvements et les valeurs de phosphore assimilable (2) (GUNARY et SUTTON, 1967 ; TRUONG, PICHOT et BURDIN, 1973 ; PICHOT et *al.*, 1973 ; LE BUANEC, 1973 ; ROCHE et *al.*, 1978 ; VAN RAIJ, 1978).

Les méthodes de dilution isotopique ne furent pas très souvent utilisées en milieu tropical et en particulier en zone ferrallitique (3). Certes, l'environnement est peu favorable à l'emploi d'un matériel fragile et coûteux. Mais il faut dire que cette technique souffre d'un certain handicap d'ordre fondamental : elle suppose en effet que pendant toute la durée de l'expérience, le système P du sol — P de la solution du sol — P des engrais — P des plantes — est en équilibre strict, ce qui risque d'être faux dans les sols ferrallitiques où le pouvoir de fixation du sol, souvent important (BOUYER, 1971), limite la mobilité du phosphore. Il existe aussi des cas où le sol libère des ions PO_4^{---} qui ne sont pas en équilibre isotopique.

---

(1) En sol très pauvre en phosphore, le phosphore contenu dans les graines peut être une cause de surestimation de la valeur L ; d'où la mise au point d'un protocole expérimental par TRUONG et PICHOT (1976).

(2) Une expérience, faite sur des sols ferrallitiques de Madagascar en utilisant la valeur E de SCOTT RUSSEL, a donné des quantités de phosphore isotopiquement échangé de 15 à 120 ppm, ce qui ne correspondrait qu'assez mal au phosphore disponible de ces sols (PICHOT et ROCHE, 1972).

(3) NEPTUNE et MURAOKA (1978) ont fait une bonne synthèse des travaux effectués à l'aide d'isotopes radioactifs qui n'inclut que fort peu d'études provenant de la zone ferrallitique du globe.

4.7. CONCEPTION DYNAMIQUE DE L'ANALYSE DE PHOSPHORE DU SOL

La notion de phosphore assimilable, telle qu'elle a été définie au paragraphe précédent, ne représente qu'une donnée statique valable à un instant précis. Elle ne tient pas compte, en principe, des réserves plus ou moins facilement mobilisables avec le temps, ainsi que de l'interchangeabilité des diverses formes du phosphore (cf. chap. IX., p. 182-189).

Des diverses méthodes proposées pour lever ce handicap, nous en retiendrons deux, le potentiel phosphorique et les facteurs de LARSEN.

Le potentiel phosphorique du sol

Cette méthode fut exposée par SCHOFIELD (1955) et WHITE et BECKETT (1964) à propos des sols d'Angleterre. En mettant en équilibre le sol avec des solutions diluées de chlorure de calcium (à concentration variable), on extrait une certaine quantité de phosphate que l'on peut exprimer sous forme d'une relation cologarithmique assez voisine de celle d'un pH :

$$\text{potentiel phosphorique} = \frac{1}{2} \text{ p Ca} + \text{p' } PO_4H_2$$

(p et p' étant les concentrations respectives de Ca et de P dans la solution d'équilibre)

Le phosphore ainsi mesuré combinerait les facteurs intensité et capacité de LARSEN (cf. paragraphe suivant). On l'exprime souvent sous forme d'un pouvoir tampon potentiel et du rapport quantité-intensité Q/I (BECKETT et WHITE, 1964).

Cette notion de potentiel phosphorique fut appliquée en milieu tropical par LE MARE (1960) en Ouganda, SALMON (1965) en Rhodésie, ADDISCOTT (1969) en Tanzanie..., sur des sols qui n'étaient certainement pas tous ferrallitiques.

Le potentiel phosphorique déterminé par LE MARE (op. cit.) en culture cotonnière en Ouganda s'échelonne de 8,16 à 6,59 : il s'est révélé un meilleur indicateur de la nutrition phosphatée du cotonnier que le phosphore extrait par les acides dilués ou les alcalis (ADDISCOTT, op. cit.).

Cette notion de potentiel phosphorique est inattaquable sur le plan théorique et on la relie aisément aux données fournies par les courbes isothermes de LANGMUIR. Malgré tout, elle semble actuellement quelque peu oubliée. Il est vrai que la méthode doit compter avec un certain nombre de difficultés de mise en œuvre (par exemple, il faut déterminer les durées d'incubation et les degrés d'humidité les plus convenables) et surtout avec les conséquences des proliférations microbiennes engendrées par les variations de pH (LARSEN et WIDDONSON, 1964 ; ADDISCOTT, 1969). Mais il existe un inconvénient plus grave : si le phosphore mesuré par le potentiel phosphorique se met effectivement en équilibre avec le phosphore labile, cet équilibre est lent à s'établir et peut subir de fortes variations lorsque les plantes puisent intensément dans la solution du sol. Expérimentalement, on constate que les valeurs du potentiel phosphorique ne sont pas toujours stables. Autre difficulté pourtant rarement signalée par les auteurs : la faiblesse des teneurs en phosphore des solutions analysées. L'emploi des radio-isotopes devrait permettre de surmonter ce handicap.

Actuellement le concept de potentiel phosphorique, sous la forme proposée par ASLYNG (1964), semble revenir en faveur pour mesurer le facteur intensité de LARSEN (DALLAL et HALLSWORTH, 1976 ; ROCHE et *al.*, 1978).

Les facteurs de LARSEN

LARSEN (1952 et 1957) a défini un certain nombre de « facteurs » représentatifs de la dynamique du phosphore dans le sol. Ce sont :

— Le facteur Quantité : c'est la quantité de phosphore présent dans la phase solide du sol.

On l'apprécie surtout par la mesure du phosphore labile (valeurs L, A, E...) mais également par le phosphore assimilable, le phosphore extrait à l'eau et parfois même le phosphore total (ROCHE et *al.*, 1978).

— Le facteur Intensité : c'est la quantité de phosphore présent dans la phase liquide, donc dans la solution du sol. On l'estime principalement par les méthodes d'ASLYNG (1954 et 1964) de mesure du potentiel phosphorique et du potentiel orthophosphorique.

— Le facteur Capacité : c'est la capacité du sol à maintenir stable la concentration en phosphore de la solution du sol, en dépit des prélèvements des racines. On le définit souvent par une capacité tampon potentielle (« potential buffering capacity » en anglais) ou une capacité tampon maximale (DALLAL et HALLSWORTH, 1976) ou encore par le pouvoir fixateur du sol (ROCHE et *al.*, 1978), faisant intervenir soit les isothermes d'absorption de LANGMUIR, soit l'indice I_L de GACHON (1966),

$$I_L = L \times \frac{L}{L + F}$$

(L étant le phosphore labile selon LARSEN et F le phosphore sous forme dissoute nécessaire pour élever la concentration des extraits Ca Cl_2 .0,01 M au niveau de 2 mg de P par litre).

Selon ROCHE et *al.* (op. cit.), l'indice I_L n'est qu'un point particulier de l'isotherme d'adsorption de LANGMUIR. Toujours suivant ces auteurs, l'aluminium échangeable donne une bonne indication du pouvoir fixateur, au moins dans les sols des régions tropicales qu'ils ont spécialement étudiés.

— Le facteur Vitesse (en anglais « rate factor »), appelé parfois facteur cinétique : c'est la vitesse de passage du phosphore de la phase solide à la phase liquide. On le mesure essentiellement par la quantité Q de phosphore désorbé par le sol sur une résine échangeuse d'anions en fonction du temps (DALLAL, 1974).

$$Q = a\, t^b$$

b étant le facteur vitesse et *a* la quantité de P désorbé en une minute.

— Le facteur Diffusion : ce facteur mesure la mobilité du phosphore de la phase liquide en fonction des gradients de concentration. Ce facteur, très délicat à mesurer, n'a pratiquement jamais été étudié de façon suivie.

Ce facteur, très délicat à mesurer, n'a pratiquement jamais été étudié de façon suivie.

Les facteurs de LARSEN ont l'immense mérite de clarifier et d'ordonner de façon logique les diverses méthodes d'analyse du phosphore. Il est évident que pour être « utiles », ils doivent s'appuyer sur une méthodologie adéquate ; or celle-ci suit avec peine et avec retard cet effort de réflexion : le facteur Diffusion est très rarement pris en compte, faute sans doute de pouvoir le mesurer convenablement ; quant aux facteurs Intensité et Vitesse, si l'on en croit les conclusions de DALLAL et HALLSWORTH (1976) pour les sols d'Australie, ils ne seraient que de peu d'intérêt dans l'état actuel des techniques analytiques.

Le jugement de ROCHE et *al.* (1978) est plus nuancé : ces auteurs concèdent que le facteur Vitesse peut être utile pour mieux apprécier la fertilité phosphorique des sols tropicaux, mais ils n'en accordent pas moins la priorité aux facteurs Capacité et Quantité. En ce qui concerne les sols ferrallitiques, les méthodes qui, selon eux, présentent les meilleures corrélations avec l'alimentation phosphorique des plantes seraient par ordre décroissant d'intérêt :

Indice I_L de GACHON	Facteur Capacité
Valeur L de LARSEN	Facteur Quantité
P assimilable BRAY N° 2	Facteur Quantité
P assimilable Bondy	Facteur Quantité.

De toute façon, quelle que soit la méthode (à part l'indice I_L de GACHON), il faut toujours tenir compte du pouvoir fixateur des sols pour l'interprétation des résultats.

4.8. COMPARAISON ENTRE DIFFERENTES METHODES DE MESURE DU PHOSPHORE ASSIMILABLE

Quelques exemples sont donnés ci-dessous à titre indicatif, sans prétendre à une exhaustivité illusoire dans un domaine où de nombreux chercheurs se sont efforcés d'y voir clair sans trop y parvenir.

Méthodes chimiques comparées entre elles

Travaillant sur quarante-huit types de sols du Ghana, OTENG et ACQUAYE (1971) ont cherché des corrélations entre 10 méthodes chimiques d'extraction du phosphore et le phosphore effectivement présent dans une culture de mil (expérience en pots) ; les deux meilleures corrélations, respectivement r = 0,96 et r = 0,91, furent obtenues avec OLSEN et *al.* (1954), extraction au bicarbonate, et la méthode d'extraction à l'eau (WATANABE et OLSEN, 1965) ; les méthodes BRAY N° 2 et MORGAN (1937) ne donnent que des corrélations moyennes, respectivement r = 0,78 et r = 0,68. Quant aux autres méthodes BRAY N° 1 (BRAY et KURTZ, 1945), TRUOG (TRUOG, 1930), elles se sont montrées sans corrélation aucune avec OLSEN, donc sans intérêt de l'avis des auteurs consultés.

Même conclusion énoncée par WALMSLEY et CORNFORTH (1973) qui ont travaillé sur divers types de sols des Antilles : la meilleure corrélation avec les rendements des plantes fut trouvée avec OLSEN (OLSEN et *al.*, 1954), tandis que l'extraction par les résines anioniques (AMER et *al.*, 1955) était à peine inférieure ; les autres méthodes expérimentées, BONDORF (1952), MORGAN (1937), JORET et HEBERT (1955), EGNER et *al.* (1960), et surtout TRUOG (1930) s'étaient montrées sans intérêt.

C'est à une conclusion similaire qu'arrive MAIDA (1978) à propos de la détermination du phosphore assimilable dans dix sols du Malawi : la méthode BRAY n'est valable que si P-sol et P-Ca fournissent l'essentiel de l'alimentation en phosphore des plantes ; sinon il faut adopter d'autres méthodes (OLSEN, SAUNDER, résine, North Carolina). A noter que ces sols du Malawi ne sont pas très acides, les pH $CaCl_2$ allant de 4,4 à 6,4, ce qui correspond en gros à des pH_{H_2O} allant d'un peu plus de 5 à 7.

Sans doute parce que les sols brésiliens sont en majorité à réaction nettement acide, VAN RAIJ (1978) se montre plus catégorique : pour lui, les réactifs type TRUOG, MEHLICH, North Carolina, BRAY, sont inadaptés aux sols du Brésil ; il leur préfère OLSEN comme méthode de routine, à défaut de pouvoir mettre en œuvre les résines échangeuses d'ions et la valeur L de LARSEN.

On trouvera dans les tableaux VIII.6. et VIII.7, les valeurs absolues du phosphore extrait pour plusieurs méthodes chimiques sur des sols ferrallitiques. Il s'y confirme que les valeurs données par TRUOG et BRAY sont si faibles qu'elles sont difficilement interprétables.

TABLEAU VIII.6. — *Comparaison du phosphore extrait par NO_3H concentré et les méthodes TRUOG, BRAY et SAUNDER d'après BOUYER et DAMOUR (1964)*

	Sols ferrallitiques	P NO_3H concentré bouillant ppm	P TRUOG ppm	P BRAY N° 1 ppm	P SAUNDER ppm
Koncouré (Guinée)	sur schiste doléritique	212	2	6	85
Koncouré (Guinée)	sur grès	83	3	4	33
Adamoua (Cameroun)	sur basalte	1 248	13	2	764
Bambari (R.C.A.)	sur schistes quartzeux	190	4	6	76

TABLEAU VIII.7. – *Comparaison entre la méthode au NO_3H concentré et les méthodes Bondy, TRUOG, SAUNDER, CHANG et JACKSON d'après PICHOT, TRUONG et BURDIN (1973)*

	Témoin	Engrais dose 1 phosphore	Engrais dose 2 en	Fumier de ferme	Fumier + Engrais dose 1
				ppm	
NO_3H concentré bouillant	190	249	362	192	318
Bondy	16,1	51	113	20	53,6
TRUOG	10,0	42	97	20	52
SAUNDER	65	134	208	85	144
CHANG et JACKSON					
P soluble	1,3	4,5	14,8	3,3	7,2
P-Al	10,4	46,5	98,8	17,6	48,7
P-Fe	20,8	39,8	58,7	25,1	47,5
P-Ca	5,1	8,0	10,7	8,9	11,1
P-org	42,6	43,0	45,0	84,3	89,1
P inclusions	110,2	107,7	133,6	51,4	114,4
P labile ppm	30,6	78,2	164,6	49,2	100,6

Comparaison entre le phosphore labile et le phosphore extrait par des méthodes chimiques

Les méthodes isotopiques de mesure du phosphore labile fournissent une donnée biologique importante : la quantité de phosphore prélevée par la plante. On peut donc la considérer théoriquement comme une valeur de référence.

PICHOT et *al.* (1973) (Tableau VIII.7.) ont montré que les méthodes chimiques classiques OLSEN, Bondy, TRUOG et SAUNDER donnaient des chiffres ou trop élevés ou trop faibles, mais liés plus ou moins étroitement aux valeurs L avec, ici, une certaine supériorité à la méthode SAUNDER (en fait, les valeurs absolues de OLSEN et Bondy sont les plus proches de L ; SAUNDER donne toujours des valeurs très élevées, c'est un phosphore « semi-total »). Si on compare le phosphore labile au fractionnement de CHANG et JACKSON (1957), on s'aperçoit que les corrélations sont bonnes avec P soluble et P-Al. D'autre part, la somme des fractions de P minéral et la valeur L sont étroitement liées par une relation linéaire. Une absence totale de corrélation montre, s'il en était besoin, que le phosphore organique n'est pas soluble.

D'une étude exhaustive sur les sols des Antilles anglophones, WALMSLEY et CORNFORTH (1973) tirent les conclusions suivantes en comparant rendements des récoltes et résultats d'analyses (le phosphore labile isotopiquement diluable n'est pas étudié, pas plus que le phosphore extrait à l'eau) : les meilleures corrélations s'établissent avec la méthode OLSEN et avec les résines échangeuses d'anions (AMER et *al.*, 1955) qui se révèlent à peine inférieures. Ensuite, mais assez loin, on trouve BRAY N° 1 et BRAY N° 2. La méthode TRUOG arrive en dernière position, à peine précédée par BONDORFF, MORGAN, JORET-HEBERT, EGNER-REHM, toutes méthodes sans intérêt pratique.

Pour VAN RAIJ (1978), les méthodes les plus adaptées aux sols brésiliens seraient par ordre décroissant : les résines échangeuses d'ions, le facteur L de LARSEN, et la méthode

OLSEN. Les extractants du type TRUOG, MEHLICH, North Carolina et même BRAY sont à rejeter.

ROCHE et *al.* (1978) ont analysé un grand nombre de sols (plusieurs centaines) provenant des régions tropicales avec les méthodes suivantes : P « total » (NO_3H bouillant), TRUOG, Bondy, BRAY N° 2, SAUNDER, P carbonate (DALLAL), P extrait à l'eau (FARDEAU et *al.*), valeur L de LARSEN, Indice I_L de GACHON. En ce qui concerne les sols ferrallitiques, les meilleures corrélations avec les prélèvements des plantes en cultures en pots sont obtenues avec l'indice I_L de GACHON, puis avec la valeur L de LARSEN. Comme ces deux méthodes ne sont pas toujours aisées à mettre en œuvre, on peut utiliser à défaut BRAY N° 2 et Bondy qui donnent des résultats satisfaisants. En particulier Bondy (OLSEN modifiée (DABIN, 1967) serait la plus recommandable dans les sols à très fort pouvoir fixateur et à forte teneur en aluminium extractible.

Il semble inutile de poursuivre ces comparaisons. Il vaut mieux tenter de tirer quelques conclusions.

Tout d'abord, un nombre important d'analyses conventionnelles doivent être rejetées dès qu'on s'adresse à des sols ferrallitiques ; ce sont en particulier celles qui mesurent le phosphore acido-soluble et, parmi celles-ci, TRUOG qu'il n'est plus convenable actuellement d'utiliser. Une exception toutefois : BRAY N° 2 et BRAY N° 3, qui ont en plus des propriétés complexantes, paraissent acceptables tant que le pH n'est pas trop bas (pH > 5,5) et tant que le sol n'est pas trop riche en fer. Il semble bien que ce soient les méthodes de dilution isotopique (valeur L, Indice I_L) qui donnent les meilleures corrélations avec les prélèvements des plantes. Quant aux résines, jusqu'à présent relativement peu employées pour les sols ferrallitiques, certains y voient le meilleur (ou l'un des meilleurs) moyen de mesurer le phosphore utilisable par les plantes.

Si pour des raisons de commodité, de rapidité ou de prix, il n'est pas possible d'employer L, I_L ou résines, ou pourra utiliser BRAY N° 2 ou N° 3 dans les conditions précisées ci-dessus, et surtout OLSEN sous sa forme originale ou sa forme modifiée (Bondy) en particulier s'il s'agit de sols acides riches en sesquioxydes de fer.

Il faut souligner ici que le principal avantage de la méthode Bondy est que les résultats qu'elle donne sont peu influencés par le pH du sol (elle paraît valable de pH 3 à pH 8), ce qui n'est pas le cas des autres méthodes.

5. LES FORMES DU POTASSIUM

5.1. GENERALITES

On s'accorde assez généralement sur les définitions du potassium du sol telles qu'elles sont formulées par WICKLANDER (1954). Cet auteur distingue quatre formes du potassium du sol, sans compter celui qui se trouve dans les bactéries et en général la flore et la faune du sol : potassium de la solution du sol, potassium échangeable, potassium fixé, potassium des réseaux cristallins.

— Potassium de la solution du sol : ce potassium est en équilibre avec le potassium échangeable ; en fait, il est difficile à distinguer de ce dernier, l'équilibre pouvant varier fortement et rapidement en fonction des conditions du milieu.

— Potassium échangeable : le potassium échangeable est par définition celui qui est fixé sur les sites d'échange du complexe absorbant. Il dépend donc, et de la teneur en argile et matière organique du sol, et de la facilité qu'ont celles-ci de se réapprovisionner en potassium (libération à partir des minéraux en voie de décomposition, apports de

cendres ou d'engrais). On verra plus loin que la proportion de potassium échangeable dépasse rarement 10 % du potassium total dans les sols ferrallitiques.

— Potassium fixé : ce potassium est fixé sur les surfaces internes des feuillets d'argile (position dite de NEMETH et *al.*, 1970) et à l'intérieur des cavités hexagonales de certains minéraux comme l'illite. A noter que, pour les minéralogistes, ce potassium fait partie de l'édifice cristallin, alors que les agronomes pensent qu'il est encore relativement accessible aux racines des plantes (contrairement à celui qui est inclus dans les mailles cristallines).

— Potassium des réseaux cristallins : le potassium des réseaux cristallins est l'un des constituants d'un certain nombre de minéraux comme l'illite, les micas hydratés, les micas, les feldspaths. Il représente la majeure partie du potassium total (BARBIER, 1962).

5.2. POTASSIUM ASSIMILABLE, POTASSIUM DIFFICILEMENT ECHANGEABLE (POTASSIUM « FIXE », POTASSIUM RESERVE AGRONOMIQUE DIT « TOTAL »)

Le potassium de la solution du sol et le potassium échangeable sont directement assimilables par les plantes. Toutefois, il apparaît qu'une partie au moins du potassium non-échangeable du sol est susceptible d'être absorbée par les racines des plantes (1). Certains auteurs, surtout anglo-saxons, ont cherché à subdiviser ce potassium en deux fractions, l'une dite « difficilement échangeable », la seconde dite « fixée », le passage d'un terme à l'autre impliquant une nette diminution dans l'accessibilité par la plante. En fait, pour préciser ces termes, on est le plus souvent obligé de recourir à un processus analytique faisant intervenir un réactif d'extraction bien défini :

— le potassium échangeable est celui qui est extrait par l'acétate d'ammoniac neutre et normal,

— le potassium difficilement échangeable est extrait par les acides dilués à froid (H_2SO_4, HCl, HNO_3, etc.),

— le potassium fixé est extrait à chaud par les acides sulfurique ou chlorhydrique à six fois la normalité ou par d'autres acides forts.

Quant au « potassium assimilable », il s'agit en général du potassium effectivement utilisé par la plante et qui comprend, bien sûr, le potassium échangeable et du potassium difficilement échangeable.

Un terme peut prêter à confusion, c'est celui de « potassium total », tel qu'il est employé, assez improprement, en pays tropicaux francophones : il s'agit d'une fraction du potassium du sol extraite après ébullition à l'acide nitrique concentré pendant cinq heures. La quantité obtenue est nettement supérieure à celle du potassium échangeable et même du potassium difficilement échangeable, mais elle paraît inférieure au potassium réellement contenu dans le sol, même dans les sols ferrallitiques où, pourtant, les minéraux primaires (non attaqués par l'acide nitrique) sont pratiquement absents. On ne saurait trop mettre en garde le lecteur contre cette appellation à propos de ce qu'il vaudrait mieux qualifier de « réserve agronomique », mais l'expression « Potassium total » est passée dans le langage courant.

Le principal inconvénient de ce « potassium total-réserve agronomique » est de quantifier une donnée pas toujours aisément reproductible analytiquement avec précision, tant elle est dépendante des conditions dans lesquelles le sol est attaqué par l'acide nitrique.

---

(1) Sans vouloir prétendre à l'exhaustivité, on peut citer par exemple les travaux de MIDDELBURG (1955) en Indonésie, NG SIEW KEE (1965) et COULTER (1972) en Malaisie, AUBERT (1958) au Gabon et au Sud-Cameroun, ACQUAYE et *al.* (1967) et AHENKORAH (1970) au Ghana, etc.

5.3. METHODES DE DETERMINATION DU POTASSIUM DU SOL (1)

Ces méthodes étant fort nombreuses, on se contentera ici d'indiquer les plus courantes :

Le potassium échangeable

— Par l'acétate d'ammonium neutre et normal : c'est la méthode classique qui donne par définition la valeur du « potassium échangeable ». Elle consiste à faire percoler 200 millilitres de réactif sur 10 grammes de sol et à analyser le potassium contenu dans le percolat. De plus en plus, cette méthode fait figure de méthode de référence.

— Par les acides dilués : l'une des méthodes les plus employées, au moins en Amérique Latine, est celle de la North Carolina University (VETTORI, 1979) ; la liqueur d'extraction est un mélange étendu d'acide sulfurique et d'acide chlorhydrique (HCl.0,25 N + H_2SO_4.0,025 N). Le même réactif, à des concentrations légèrement différentes (HCl.0,1 N + H_2SO_4.0,002 N), fut utilisé par ROBINSON (1968) en Afrique Orientale avec ou sans addition de charbon activé. Les résultats sont voisins de ceux de la méthode classique à l'acétate d'ammoniaque, le principal avantage étant de pouvoir extraire en même temps le phosphore assimilable.

— Par un mélange acide acétique-lactate d'ammonium (EGNER et *al.*, 1960) employé par ROBINSON et SEMB (1968) en Afrique Orientale : il ne semble avoir aucune supériorité bien définie sur l'acétate d'ammonium, sauf de pouvoir extraire le phosphore assimilable du même coup. Cette méthode est relativement peu utilisée.

Le potassium difficilement échangeable

— Par les acides dilués : de nombreuses méthodes furent expérimentées, mais l'une des plus utilisées, en particulier par les auteurs anglo-saxons (HAYLOCK, 1956 ; MAC LEAN, 1961 ; MAC LEAN et BRYDON, 1963 ; MOSS et COULTER, 1964 ; BINNIE et BARBER, 1964 ; PRATT, 1965), consiste à faire des extractions répétées à l'acide nitrique normal à ébullition pendant dix minutes. On met ainsi en évidence deux formes de potassium non échangeables (fig. 10) :

. un « potassium de départ » qui est une fraction en supplément du potassium échangeable, fraction qui diminue rapidement au cours des extractions successives,

. un potassium à taux constant qui est extrait en quantités égales à chaque attaque et qui, d'après HAYLOCK (1956), n'est assimilable qu'à long terme (15 mois).

Un tel raffinement dans le fractionnement n'est pas toujours indispensable. Ainsi, après avoir extrait le potassium difficilement échangeable (ici dit « fixé ») par l'acide nitrique normal bouillant, MIELNICZUK et SELBACH (1978) se sont aperçu qu'il était absorbé à 48 % par des cultures successives et répétées dans cinq sols ferrallitiques (« latossolos distróficos ») du Rio Grande do Sul au Brésil.

— Par le tétraphényl-borate de sodium. Les quantités de potassium du sol extraites par le tétraphényl-borate s'accroissent linéairement avec le temps de contact et on n'observe de palier que pour des quantités élevées qui paraissent sans commune mesure avec les prélèvements des plantes (DUTHION et GROSMAN, 1971 ; QUEMENER et *al.*, 1974). Aussi une revue de la littérature indique-t-elle des durées d'extraction qui peuvent varier suivant les auteurs de 15 minutes à 72 heures.

---

(1) On consultera en particulier DABIN (1973), communication au Colloque tenu à Abidjan par l'Institut International de la Potasse, d'où sont extraits de nombreux renseignements présentés ici.

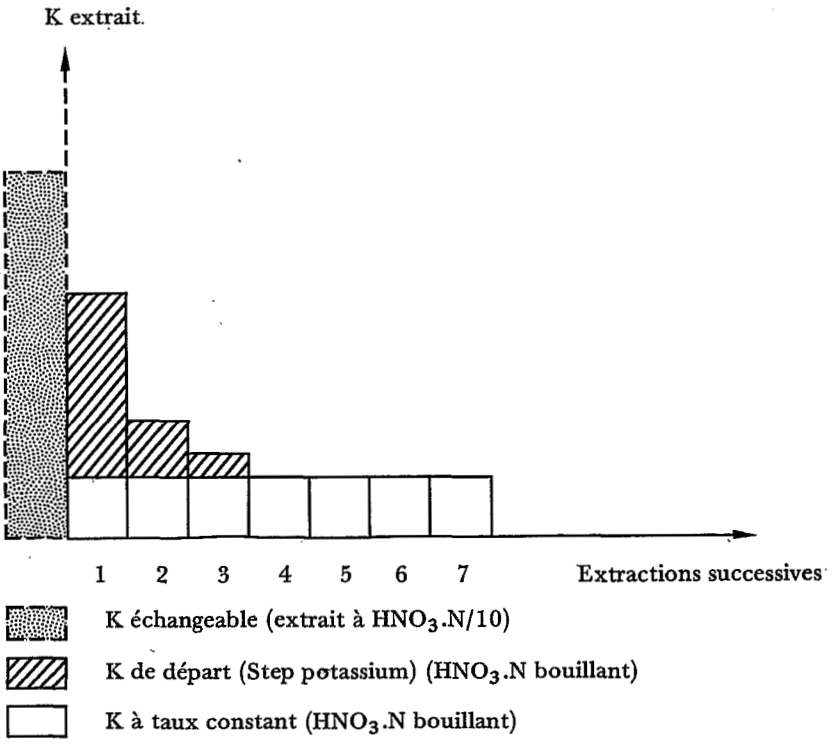


FIGURE 10

Potassium de départ et à taux constant, d'après HAYLOCK (1956)

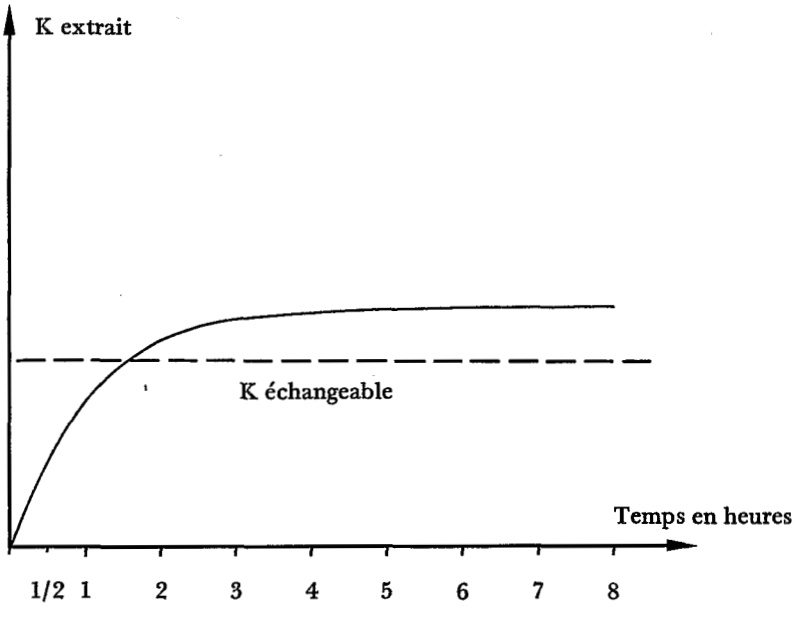


FIGURE 11

Potassium extrait à l'eau chaude d'après NASH (1971)

On semble toutefois penser que le potassium extrait au bout d'une heure représente à peu près le potassium échangeable (CABIREL, 1972, sur sols de France) ou lui est systématiquement un peu supérieur (VELLY, 1972, sur sols de Madagascar).

Des temps de réaction plus longs permettent d'apprécier les réserves mobilisables à échéance (VELLY, op. cit.). C'est ainsi que QUEMENÈR et *al.* (op. cit.) trouvent une bonne corrélation entre le potassium extrait après 24 heures de contact et les prélèvements des cultures en pots effectués suivant la méthode STANFORD et de MONT ; ces auteurs reconnaissent d'ailleurs que, sur deux des trois sols de France étudiés, la simple mesure du potassium échangeable eut permis de donner une estimation suffisante des quantités exportées par les plantes bien que la méthode au tétraphénylborate reste fort utile dans les cas d'épuisement du sol en potassium.

— Par l'eau chaude (NASH, 1971) : cette méthode originale consiste à extraire le potassium du sol par de l'eau chaude à ébullition dans un soxhlet ; les extraits sont analysés au bout d'une demi-heure, puis chaque heure jusqu'à huit heures. L'extrait au bout de huit heures est hautement corrélé avec le potassium échangeable ($r = 0{,}953$), mais lui est supérieur ; la différence correspond à la fraction « difficilement échangeable » (appelée par l'auteur « potassium lentement extractible ») (figure 11).

Le potassium fixé extrait aux acides forts

On considérera ici deux groupes de méthodes :

— L'extraction à chaud par l'acide sulfurique six fois normal, surtout pratiquée par l'école anglophone (HUNTER et PRATT, 1957) ; NG SIEW KEE, 1965 ; MOHINDER SING et TALIBUDEEN, 1969 ; COULTER, 1972 ; AHENKORAH, 1970). On définit ainsi, par différence avec les potassiums échangeable et difficilement échangeable, un potassium fixé. Les résultats sont très variables selon les types de sols, à tel point qu'au Nigéria oriental le potassium extrait par cette méthode équivaut en gros au potassium échangeable (EKPETE, 1972).

— L'extraction par l'acide nitrique concentré bouillant pendant cinq heures. Cette méthode utilisée par les stations agronomiques françaises fut introduite dans les pays tropicaux francophones pour mesurer une réserve agronomique de potassium improprement baptisée « potassium total ». Comme les résultats ne sont pas toujours reproductibles avec une précision suffisante, cette méthode souffre d'une certaine désaffection. Les corrélations entre les résultats obtenus par cette méthode et les prélèvements par les plantes sont dans l'ensemble mauvaises. Il y a donc peu d'intérêt à l'utiliser de façon systématique.

Le potassium total

Les seules méthodes qui dissolvent le sol sans laisser de résidus et, donc, permettent de doser correctement l'intégralité du potassium du sol sont l'attaque fluoperchlorique et la fusion alcaline.

La méthode aux trois acides (mélange d'acides nitrique, sulfurique et chlorhydrique ; CLAISSE, 1968), si elle attaque bien les minéraux secondaires (argile par exemple) n'extrait qu'une faible part du potassium des minéraux primaires et vraisemblablement aussi des concrétions ferrugineuses. Les chiffres obtenus n'incluent donc pas la totalité du potassium du sol, mais s'en approchent avec une bonne approximation pour les sols ferrallitiques.

Détermination du potassium assimilable par équilibre d'échange avec les solutions très diluées

La technique actuellement la plus employée est celle de BECKETT (1964) qui dérive des travaux de WOODRUFF et de l'application de l'équation de GAPON. La formule de

WOODRUFF mesure le changement d'énergie libre lors d'une réaction d'échange des ions K, Ca et Mg dans un équilibre sol-eau :

$$\Delta F = RT\, L_n \frac{CK}{\sqrt{CCa + CMg}}$$

où R est la constante des gaz parfaits, T la température absolue et C la concentration des ions en moles par litre. L'équation de GAPON définit l'équilibre entre le sol et la solution :

$$\frac{K\ sol}{Ca\ sol} = H \frac{CK}{\sqrt{CCa}}\ solution$$

K étant une constante et C une concentration proportionnelle aux activités de chacun des ions.

BECKETT (op. cit.) détermine le rapport d'activité du potassium AR_K par la formule suivante :

$$AR_K = \frac{a\,(K)}{\sqrt{a\,(Ca + Mg)}} \qquad \text{(a étant l'activité).}$$

Pour ce faire, on met en équilibre, pendant 12 à 25 heures, de petits échantillons de sols (5 grammes) avec des solutions diluées de KCl (concentration 10^{-4} M à 10^{-3} M) dans du $CaCl_2$ de concentration 2 à $7\text{-}10^{-3}$ Mole. En dosant K, Ca et Mg dans les solutions, on peut calculer la valeur ΔK par différence entre la solution initiale et les diverses solutions finales. La mise sur graphique des valeurs respectives de ΔK (appelé aussi Q_K pour variation de quantité) et AR_K (appelé aussi I pour intensité) donne une courbe représentant les variations du rapport Q/I (rapport Quantité-Intensité).

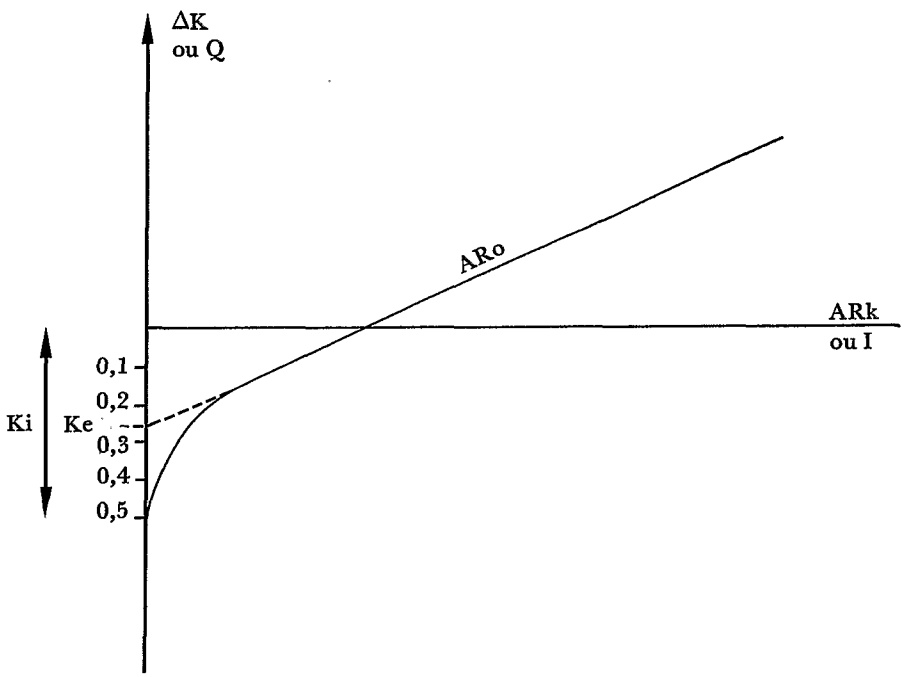


FIGURE 12

Courbe des variations du rapport Q/I d'après BECKETT (1964)

Le pouvoir tampon potentiel ou PBC (de l'anglais « Potential Buffering Capacity ») d'un sol pour le potassium mesure la quantité de potassium labile. Il est défini par la pente de la courbe précédente et donc par la dérivée première de la fonction $\frac{\Delta D}{\Delta I}$. C'est également une fonction du calcium et du magnésium échangeables. Pour fixer les idées, on peut dire que le PBC est une grandeur qui définit la plus ou moins grande constance de la phase soluble au cours des variations de la phase adsorbée.

Les sols tropicaux, et en particulier les sols ferrallitiques, étant souvent pauvres en calcium et magnésium et, par contre, parfois riches en aluminium échangeable, TINKER (1964) et FORDE et *al.* (1966) ont introduit l'aluminium dans l'équation donnant le rapport d'activité AR_K (« activity ratio » en anglais) baptisé pour la circonstance rapport d'activité unifié AR_{KU} :

$$AR_{KU} = \frac{a(K)}{\sqrt[2]{a\,(Ca + Mg)} + \sqrt[3]{Al}}$$

Avec ou sans cette modification, rapport d'activité et pouvoir tampon potentiel furent assez largement utilisés en zone intertropicale anglophone et en Amérique Latine (1).

Si dans les sols tempérés britanniques, l'absorption du potassium par les plantes est en relation étroite avec le rapport d'activité AR_K selon ADDISCOTT et TALIBUDEEN (1959), ces mêmes auteurs n'ont pas trouvé de corrélation bien nette entre AR_K et la nutrition potassique du *Pueraria* dans les sols de Malaisie carencés en potassium, peut-être à cause des très faibles valeurs de ce rapport. TINKER (1964) note toutefois une meilleure concordance en utilisant le rapport d'activité unifié AR_{KU} (incluant l'aluminium) en ce qui concerne le potassium absorbé par le palmier à huile en Nigéria. En fait, d'après plusieurs auteurs, le rapport d'activité convient assez bien lorsqu'il s'agit de différencier entre eux des sols de propriétés très différentes.

De son côté, le pouvoir tampon potentiel (PBC) rend bien compte de l'épuisement d'un sol en potassium par des cultures successives et est en bonne corrélation avec la capacité d'échange de bases.

Le principal inconvénient de la méthode définie par BECKETT réside dans la longueur et la multiplicité des extractions et des analyses, la précision de ces dernières étant en outre handicapée par la faiblesse des quantités de potassium mises en jeu. Aussi peut-on considérer, malgré certains résultats prometteurs, qu'il s'agit plus d'un outil de recherche que d'un procédé pratique pour l'appréciation immédiate des disponibilités en potassium d'un sol donné ; dans ce cas, la détermination du potassium échangeable est souvent suffisante.

Le potassium assimilable extrait par des méthodes physico-chimiques

— *Par électrodialyse.* La méthode utilisée est habituellement celle de REITEMEIER et *al.* (1972) qui paraît n'avoir été que rarement employée pour les sols ferrallitiques. Suivant le temps et l'intensité du courant, on extrait des formes plus ou moins difficilement échangeables.

— *Par résines échangeuses d'ions.* Les résines échangeuses de cations furent assez largement utilisées, mais relativement peu pour les sols tropicaux. Les temps d'extraction sont très variables suivant les auteurs, de quelques jours à 43 jours, ce qui permet d'obtenir des formes de plus en plus difficilement échangeables. La différence entre le potassium extrait par une résine en deux jours et le potassium échangeable est appelée « potassium modérément disponible ».

---

(1) On peut citer en particulier TINKER (1964) et FORDE et *al.* (1966) en Nigéria du sud, MOSS et COULTER (1964) aux Antilles, ACQUAYE et *al.* (1967) au Ghana, MOHINDER SING et TALIBUDEEN (1966) en Malaisie, GRAHAM et FOX (1971) aux Hawaï, MIRANDA et *al.* (1971) au Brésil, etc.

— *Par dilution isotopique.* A l'image des dilutions isotopiques largement utilisées pour le phosphore, on a cherché à employer cette méthode pour le potassium (GRAHAM et FOX, 1971 aux Hawaï ; MAZOZERA et BOUYER, 1971 pour l'Afrique Occidentale). On définit ainsi un pool labile de potassium. Cette méthode ne paraît n'avoir été qu'assez rarement mise en œuvre. Aussi est-il difficile de donner des conclusions sur son intérêt pour apprécier les réserves potassiques du sol utilisables par les plantes.

5.4. DISCUSSION : COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES METHODES DE MESURE DU POTASSIUM DU SOL

Dans l'énumération des méthodes de dosage du potassium on a volontairement passé sous silence les tests biologiques parce que rarement utilisés par les laboratoires.

Malgré cette omission, il n'y a qu'un nombre restreint des méthodes citées ci-dessus qui sont employées couramment dans la pratique agronomique. Deux problèmes préoccupent au premier chef les agronomes : d'une part, le potassium immédiatement assimilable, d'autre part le potassium susceptible de devenir assimilable à terme, c'est-à-dire les réserves facilement mobilisables.

Potassium assimilable dans l'immédiat

Ce potassium comprend le potassium échangeable, plus un potassium dit difficilement échangeable que les racines arrivent à extraire parfois en quantité égale à celle du potassium échangeable. Pour l'évaluer, on préconise souvent la mesure du potassium isotopiquement diluable réputée rendre mieux compte des prélèvements de la plante, ou encore le potassium extrait par le tétraphényl-borate de sodium qui mesurerait aussi le potassium susceptible de devenir très vite assimilable (DUTHION et GROSMANN, 1971).

Une étude faite sur un sol ferrallitique de Côte d'Ivoire par CABANETTES, TRUONG BING et EGOUMENIDES (1973) (Tableau VIII.8.) a montré qu'effectivement, le potassium isotopiquement diluable était quelque peu supérieur en quantité au potassium échangeable, mais qu'il en suivait très étroitement les variations. Quant au potassium extrait par le tétraphénylborate de sodium, il n'est statistiquement pas différent du potassium échangeable.

En somme, ici, ces trois méthodes donnent des résultats sensiblement équivalents, contrairement à ce qui se passe dans les sols tempérés. Les auteurs pensent que, dans ces derniers sols, la dilution isotopique et le tétraphénylborate de sodium extraient le potassium rétrogradé entre les feuillets des argiles expansives (smectites, illites, vermiculites), d'où des valeurs de potassium nettement supérieures au simple potassium échangeable ; or, dans les sols ferrallitiques, la rétrogradation n'existe pas et seul le potassium échangeable paraît concerné à peu de choses près.

La méthode Quantité/Intensité telle qu'elle fut préconisée par BECKETT (1964) ne paraît pas donner dans les sols ferrallitiques des résultats très différents du potassium échangeable, parfois un peu plus représentatifs de l'absorption par les plantes si l'on en croit certains auteurs, mais cette « qualité » un peu supérieure ne paraît pas justifier des extractions multiples pour un même échantillon.

Il apparaît donc que la mesure du potassium échangeable, malgré des insuffisances, reste, par sa simplicité de mise en œuvre, un moyen actuellement irremplaçable d'estimation du potentiel potassique du sol.

Un coup d'œil sur les teneurs en potassium du sol de Gagnoa (tableau VIII.8.) doit inciter à la modestie. Pourquoi chercher une méthode optimale d'évaluation du potassium, alors que, sur un même type de sol, il peut y avoir, selon les blocs, des variations du simple au double.

TABLEAU VIII.8. — *Comparaison du potassium isotopiquement diluable Ki, du potassium échangeable (Acétate de NH_4) et du potassium extractible par le tétraphénylborate de sodium dans l'horizon supérieur d'un sol ferrallitique remanié modal près de Gagnoa (Côte d'Ivoire) d'après* CABANETTES, TRUONG BING *et* EGOUMENIDES *(1973)*

Sol cultivé 1969	Ki	K éch.	K NaTPB
	Milliéquivalent pour 100 g de terre fine		
Sans fumure			
Bloc I	0,57	0,50	0,46
II	0,76	0,34	0,30
III	0,40	0,18	0,23
IV	0,29	0,14	0,12
V	0,78	0,49	0,47
VI	0,76	0,46	0,43
VII	0,37	0,14	0,12
VIII	0,46	0,23	0,18
Fumure minérale complète			
Bloc I	0,81	0,47	0,38
II	0,83	0,53	0,50
III	0,61	0,34	0,38
IV	0,35	0,18	0,13
V	0,67	0,44	0,40
VI	0,65	0,36	0,33
VII	0,47	0,24	0,24
VIII	0,30	0,14	0,16

Potassium facilement mobilisable à partir des réserves

Ce problème sera traité à propos de la dynamique du potassium (chap. X, p. 198-201), mais il est possible, grâce aux tableaux VIII.9., VIII.10. et VIII.11. d'estimer les réserves de quelques sols.

Si l'on en juge par les exemples venant du Brésil et de Malaisie, le potassium fixé est très variable mais les méthodes d'analyse, assez différentes par les réactifs et leurs concentrations, empêchent toute comparaison valable. Le « potassium total - réserve agronomique » de la méthode française est sans doute parfois proche du potassium total réel (bien qu'inférieur en quantité) dans les sols ferrallitiques. D'après le tableau VIII.11., le rapport K éch./K total x 100 y est souvent de l'ordre de 1 à 10 %, mais avec une variabilité considérable. On sait que les valeurs obtenues par l'acide nitrique concentré bouillant sont, pour le potassium, très dépendantes des conditions d'attaque, d'où une incertitude sur le résultat final. Quant au potassium total, extrait par attaque fluo-perchlorique (tableau VIII.9.) ou attaque aux trois acides (tableau VIII.12.), il représente à quelques « pour cent » près la quasi totalité du potassium du sol.

TABLEAU VIII.9. — *Comparaison entre potassium échangeable, potassium fixé et potassium total dans l'horizon supérieur de 5 sols ferrallitiques fortement désaturés du Rio Grande do Sul (Brésil) d'après* MIELNICZUK *et* SELBACH *(1978)*

Sol	pH eau	K échang. mé/100 g	K fixé mé/100 g	K total mé/100 g	K éch. x 100 / K total %
Latossolo Vermelho escuro distrófico (Alta)	5,0	0,13	0,23	4,06	2,82
Latossolo Vermelho escuro distrófico (Funda II)	5,1	0,17	0,29	4,11	4,13
Latossolo Vermelho Roxo distrófico	4,7	0,23	0,35	4,17	5,51
Latossolo Bruno avermelhado distrófico	5,2	0,35	0,54	8,65	4,04
Latossolo Vermelho escuro distrófico	4,8	0,65	0,82	5,68	7,51

K échangeable extrait à l'acétate d'ammoniac neutre et normal ; K « fixé » extrait par NO_3H-N bouillant ; K total par $H_2SO_4 + HClO_4 + HF$

TABLEAU VIII.10. — *Potassium échangeable et potassium extrait aux acides forts (HCl.6 N) dans trois sols ferrallitiques de Malaisie — R.R.I.M., 1976*

	Potassium échangeable mé/100 g		Potassium extrait aux acides forts - mé/100 g	
Profondeur	0-15 cm	15-30 cm	0-15 cm	15-30 cm
Série Durian	0,12	0,10	1,26	1,55
Série Selangor	0,26	0,30	3,20	4,10
Série Serembam	0,09	0,07	2,52	2,99

TABLEAU VIII.11. — *Comparaison entre potassium échangeable et potassium « total » (extrait à HNO_3 concentré bouillant) dans quelques sols ferrallitiques d'Afrique et de Guyane*

Localisation	Prof. cm	K échang. mé/100 g	K « total » mé/100 g	% K échang. / K total	Auteurs
Profil d'un sol ferrallitique moyennement désaturé, remanié issu de granite calco-alcalin, sol sous forêt près de Divo, Côte d'Ivoire.	0-1	0,30	0,86	34,8	ROOSE et JADIN (1969)
	1-10	0,03	0,59	5,0	
	10-30	0,04	0,58	6,9	
	50-65	0,03	0,30	10	
	80-100	0,01	0,31	3,2	
	125-135	0,02	0,28	7,1	
	175-200	0,02	0,16	12,5	
	240-260	0,02	0,43	4,6	
Sol ferrallitique argileux fortement désaturé sous savane, vallée du Niari, Congo.	0-15	0,30	1,60	17,7	de BOISSEZON (1967)
	15-30	0,04	1,30	3,0	
Sol ferrallitique fortement désaturé, lessivé, modal, profond, dérivé de granite. St Jean N.E., Guyane française.	1-10	0,16	3,23	4,9	BLANCANEAUX (1970)
	20-30	0,08	4,72	1,7	
	40-50	0,04	4,82	0,8	
	60-80	0,02	5,13	0,4	
	100-110	0,04	6,67	0,6	
Sol ferrallitique rouge faiblement désaturé, remanié, induré. Batanfago République Centrafricaine.	0-10	0,12	1,10	10,9	BOULVERT (1969)
	15-25	0,04	—	—	
	60-70	0,03	0,90	3,3	

TABLEAU VIII.12. — *Comparaison potassium échangeable et potassium total (extrait par attaque aux trois acides) dans quelques sols de République Centrafricaine (Batangafo-Moussafoyo) d'après BOULVERT (1969)*

	Prof. cm	K échang. mé/100 g	K total mé/100 g	K éch. x 100 / K total %
Sol ferrallitique rouge, moyennement désaturé, typique	0-8	0,27	—	—
	20-30	0,04	—	—
	60-70	0,03	2,97	1,01
Sol ferrallitique moyennement désaturé, appauvri, rouge	0-10	0,52	—	—
	10-22	0,32	2,97	10,70
	25-35	0,30	2,97	10,10
Sol ferrallitique moyennement désaturé, ocre, appauvri, hydromorphe	0-10	0,07	—	—
	15-25	0,03	1,70	1,70
	35-45	0,02	—	—
	70-80	0,02	2,55	0,78
	130-140	0,02	—	—
	170-180	0,02	0,42	4,70

6. LES FORMES DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM

Comme pour le potassium, on reprendra ici la distinction classique entre éléments échangeables et éléments totaux ou de réserve.

6.1. CALCIUM ET MAGNESIUM ECHANGEABLES

Le complexe absorbant

Le calcium et le magnésium se fixent au même titre que les autres cations sur la surface des colloïdes minéraux, en neutralisant les charges négatives de ces colloïdes. Calcium et magnésium forment habituellement dans les sols entre 60 et 95 % des bases dites échangeables.

Une infériorité du pouvoir fixateur des sols ferrallitiques par rapport à d'autres types de sol provient du fait que la kaolinite, principal sinon exclusif colloïde minéral de ces sols, possède une capacité d'échange faible, 5 à 10 milli-équivalents pour 100 g, contrairement à l'illite (20 à 30 mé/100 g), aux montmorillonites (80 à 120 mé/100 g) et aux vermiculites (80 à 130 mé/100 g). Toutefois, une argile de la famille de la kaolinite, l'halloysite, fréquente dans les sols dérivés de roches effusives alcalines (basalte par exemple), a une capacité d'échange voisine de celle de l'illite, soit 20 milliéquivalents pour 100 grammes.

Il existe normalement un peu d'illite dans la plupart des sols ferrallitiques, mais la faiblesse de ses teneurs (apparemment 1 à 2 % de la fraction 0-2 microns) interdit de lui attribuer un rôle effectif dans la fixation des cations par le complexe absorbant. On a signalé au Gabon des sols ferrallitiques bien fournis en illite héritée (TERCINIER, com. pers.) ou encore à la Trinidad des oxisols comportant des proportions notables de smectites en mélange avec de la kaolinite (AHMAD et DAVIES, 1970). Malgré tout, ces sols restent des exceptions si l'on considère l'immense extension des sols ferrallitiques.

Fort heureusement, la matière organique ajoute à la partie supérieure des sols une capacité d'échange importante, entre 100 et 200 milliéquivalents pour 100 grammes de matière organique dans les sols forestiers de Côte d'Ivoire selon de BOISSEZON (1973) ; cet auteur remarque d'ailleurs qu'il s'agit d'une valeur intermédiaire entre les humus à Mor et à Mull des pays tempérés (pour ces derniers, la capacité d'échange tourne autour de 350 à 400 milliéquivalents pour 100 grammes de matière organique, d'après DEMOLON, 1952). Comme l'horizon supérieur des sols sous forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire contient entre 5 et 11 % de matière organique, celle-ci est responsable de 45 à 85 % de la capacité d'échange de cet horizon ; quant aux sols sous savane de ce pays, leurs teneurs plus faibles en humus, entre 1,5 et 8 % de matières organiques, impliquent un rôle moindre dans les propriétés du complexe absorbant.

Cette importance de la matière organique dans le complexe absorbant, et donc au premier chef sur la fixation du calcium et du magnésium, explique les pertes de cations alcalino-terreux lors de la mise en culture ; en effet, celle-ci provoque une destruction accélérée de la matière organique, donc une forte réduction de la capacité d'échange comme on le verra plus loin (cf. chap. IX, p. 162-165).

D'après la loi de GOUY, toutes les positions d'échange auraient la même affinité pour n'importe quel cation. Il apparaît que c'est inexact pour le potassium (BECKETT, 1964 ; MOHINDER SING, 1970 ; BOYER, 1973). Le même phénomène se produirant pour le magnésium qui ne pourrait se fixer que sur une quantité limitée de situations d'échange propres à ce cation (MOKWUNYE et MELSTED, 1973). Par contre, le calcium semble pouvoir être

adsorbé à peu près partout sur le complexe absorbant (comme d'ailleurs l'aluminium ionique Al^{+++}).

La saturation du complexe absorbant par le calcium et le magnésium

On a vu précédemment que le calcium et le magnésium forment en gros entre 60 et 90 % des bases fixées sur le complexe absorbant. Mais ceci ne veut pas dire que la capacité d'échange du sol se trouve automatiquement saturée ; bien au contraire, les sols ferrallitiques montrent des saturations variables et souvent très faibles, à tel point que la classification française (C.P.C.S., 1967) prend comme premier critère de subdivision des sols ferrallitiques le degré de saturation en bases dans l'horizon B.

Les sols ferrallitiques bien saturés en surface avec des coefficients de saturation en bases de 60 à 90 % sont relativement rares : on peut citer des ochrosols du Ghana, quelques sols sur roches basiques en Afrique Occidentale et Centrale et en Amérique Latine (sols à cacaoyers du sud de l'Etat de Bahia, certaines Terras Roxas du São Paulo et du Paraná au Brésil, sols « jeunes » des Antilles, etc.), ce qui correspond souvent à des teneurs en calcium et magnésium de l'ordre de 6 à 12 milliéquivalents pour 100 grammes de sol ; les sols moyennement désaturés en surface, soit des saturations tournant autour de 40 % (fourchette entre 20 et 60 % du taux de saturation), sont beaucoup plus fréquents : la somme des bases échangeables, pour fixer les idées, s'étale entre 2 et 6 mé/100 g (valeur moyenne) ; enfin, il y a les étendues immenses de sols très désaturés en surface — taux de saturation toujours inférieur à 20 % — qui comportent une impressionnante part de sols ayant moins de 10 % et même 5 % de bases échangeables par rapport à la valeur du complexe d'échange : pour ces derniers, les teneurs en bases échangeables sont alors très généralement de l'ordre de 1 mé/100 g ou inférieures à cette valeur (Amazonie, Gabon, Congo, Zaïre, Afrique Orientale, Madagascar, Malaisie, etc.). Dès que le pH s'abaisse au-dessous de 5, l'aluminium échangeable a tendance à devenir le cation le plus abondant du complexe absorbant.

Ces sols très désaturés existent, bien sûr, en Afrique Occidentale et Centrale (au nord de l'équateur), mais ils y sont en définitive relativement peu fréquents, en tout cas beaucoup moins qu'en Afrique au sud de l'Equateur, à Madagascar, en Extrême-Orient et en Amérique du Sud. On avait suggéré que les poussières apportées par l'Harmattan, ce vent de Nord-Est qui souffle du Sahara sur l'Afrique Noire au nord de l'Equateur pouvaient contribuer à conserver, sinon à augmenter, le patrimoine cationique des sols (BOYER, 1978). Il est intéressant de découvrir, après coup, que KELLOG et ORVEDAL (1969) avaient déjà formulé cette hypothèse auparavant.

Libération du calcium et du magnésium à partir du complexe absorbant

On admet généralement que les lois de DONNAN régissent l'équilibre des éléments minéraux entre le complexe absorbant et la solution du sol ; tout appauvrissement relatif de cette dernière — par exemple à la suite de prélèvements par les racines — entraîne la libération d'une quantité correspondante de cations à partir du complexe d'échange ; inversement, son enrichissement — après une fumure minérale par exemple — provoque une fixation supplémentaire sur les colloïdes du sol.

En fait, la difficulté de déplacer les cations alcalino-terreux à partir du complexe d'échange des argiles intervient dans l'ordre suivant (PRINCE et *al.*, 1947) :

$$Mg < Ca < Ba$$

avec cette restriction que les proportions relatives entre cations ont également leur importance. En effet, si on appauvrit progressivement un sol en calcium échangeable, cet élément passe de plus en plus difficilement dans la solution ; c'est alors le magnésium qui est préférentiellement enlevé du complexe absorbant aux très basses teneurs en calcium (DEMOLON, 1952 ; SALMON, 1963).

Bien que ces considérations dérivent d'études faites en pays tempérés, il semble qu'on puisse les transposer sans difficulté aux sols ferrallitiques. On verra plus loin (chap. X, p. 208) que la lixiviation du calcium et du magnésium concerne surtout le calcium, lorsque le sol est relativement bien pourvu en cet élément et le magnésium si le sol contient peu de calcium et beaucoup de magnésium.

On a principalement parlé ici des argiles. Bien que les colloïdes organiques présentent les mêmes phénomènes de sorption et désorption de bases par équivalence ionique, leurs surfaces internes sont plus difficilement accessibles aux échanges que celle des colloïdes minéraux. Cette difficulté, sensible pour les humus bruts, paraît s'atténuer considérablement s'il s'agit d'un Mull bien mélangé à la matière minérale. Malgré tout, les deux types de colloïdes ont tendance chacun à régler leurs échanges d'ions suivant une dynamique qui leur est propre, ceci étant tout aussi valable pour les sols tempérés que pour les sols ferrallitiques (DEMOLON, 1952 ; de BOISSEZON, 1973).

Quoi qu'il en soit, il est certain que les cations alcalino-terreux échangeables ont une mobilité plus faible que les ions alcalins (essentiellement le potassium et le sodium) ; ce fait, qui ressortait déjà d'études anciennes sur le complexe absorbant, se trouve confirmé, surtout en ce qui concerne le calcium, par des travaux faisant intervenir les isotopes radioactifs, tant sur les sols des pays tempérés (NEWBOULD et RUSSEL, 1963), que sur les sols ferrallitiques (MAZOZERA et BOUYER, 1971).

On peut ajouter que calcium et magnésium déplacent facilement l'aluminium échangeable fixé sur le complexe absorbant (BOYER, 1976).

Variations saisonnières des teneurs du sol en calcium et magnésium échangeables et du pH

On a remarqué que la somme des bases échangeables pouvait présenter une certaine variabilité au cours de l'année, ainsi que le pH, donnée qui synthétise un certain nombre de caractéristiques du sol, en particulier la saturation du complexe absorbant par ces bases.

A vrai dire, les résultats des mesures sont plus nets sur des types de sols autres que les ferrallitiques (BOYER, 1978) ; dans ces derniers, les teneurs en bases souvent faibles ne permettent pas toujours d'établir des corrélations significatives. En outre, c'est un sujet de recherche qui a peu attiré pédologues et agronomes.

Toutefois, MARTIN G. (1958) a trouvé que le pH des sols de la vallée du Niari (Congo) variait de 1 unité si ces sols étaient cultivés et de 0,5 unité sous savane, ce qui implique une variation des bases échangeables comportant une valeur maximale en saison sèche et une valeur minimale au cœur de la saison des pluies. Il faut noter que le climat de cette partie méridionale du Congo est très contrasté avec une saison sèche pratiquement sans pluie de mai à septembre.

Par contre, dans le sol ferrallitique fortement désaturé, couvert de forêt, de Komono au nord de Sibiti (Congo), de BOISSEZON (com. pers.) ne peut mettre en évidence aucune variation saisonnière bien nette (tableau VIII.13).

TABLEAU VIII.13. — *Variations saisonnières des bases échangeables et du pH dans un sol forestier de Komono (Congo) d'après de BOISSEZON (com. pers.)*

Dates des prélèvements	13-XI	18-I	12-III	10-V	11-VII	21-IX	23-XI
Ca éch. mé/100 g	0,22	0,39	0,33	0,31	0,26	0,26	0,26
Mg éch. mé/100 g	0,04	0,01	0,09	0,12	0,02	0,07	tr.
S.B.E. mé/100 g	0,49	0,61	0,62	0,64	0,47	0,51	0,47
pH	4,10	4,10	4,10	4,0	4,0	3,90	4,10

Le climat est pluvieux toute l'année bien qu'une saison sèche, fort peu marquée, s'étende théoriquement de juin à septembre ; l'ambiance forestière atténue encore les effets d'une éventuelle dessiccation du sol (si elle a lieu). En plus, les très faibles teneurs en bases échangeables, combinées avec l'imprécision des analyses qui en découle, introduisent un facteur d'incertitude. Il n'est donc pas étonnant que toute évolution saisonnière, si elle existe, se trouve masquée, contrairement à ce qui se passe dans la vallée du Niari.

Il apparaît certain que les variations des taux de bases échangeables au cours de l'année ne sont pas suffisantes dans les sols ferrallitiques pour influer en quoi que ce soit sur l'alimentation des plantes. Toutefois, on peut recommander aux expérimentateurs désirant faire une étude précise d'effectuer leurs prélèvements à dates fixes, afin d'avoir toujours des résultats analytiques parfaitement comparables entre eux.

6.2. LE CALCIUM ET LE MAGNESIUM TOTAUX ET LE PROBLEME DES RESERVES CALCIQUES ET MAGNESIENNES

Importance comparée des réserves en calcium et magnésium

Le calcium et le magnésium échangeables ne forment qu'une partie du total de ces éléments et une partie souvent assez faible.

Lorsque l'on compare, en sols ferrallitiques, calcium et magnésium échangeables d'une part, calcium et magnésium totaux d'autre part, on s'aperçoit que si les réserves magnésiennes sont habituellement élevées par rapport à la fraction échangeable, celles de calcium sont relativement faibles.

Quelques exemples permettront au lecteur de se fixer les idées. Ainsi, l'horizon superficiel des sols de l'État de São Paulo (Brésil) possède entre 0,01 et 2,0 milliéquivalents de magnésium échangeable pour 100 grammes de sol, alors que le magnésium total est compris entre 1,6 et 3,4 milliéquivalents ; en tonnage, pour 3.000 tonnes de terre à l'hectare, on a entre 57 tonnes et 122 tonnes de magnésium total, chiffres à comparer avec les 30 tonnes — en moyenne — de calcium total de ces sols (MALAVOLTA, 1967), alors qu'habituellement le calcium échangeable est nettement plus abondant que le magnésium échangeable. De même, en Casamance, les horizons superficiels des sols rouges ont 20 à 30 % de leur calcium et 55 à 80 % de leur magnésium sous forme non-échangeable, lorsqu'ils se trouvent encore sous couvert forestier non perturbé (à noter que la technique analytique utilisée, attaque par NO_3H concentré et bouillant, ne donnant probablement pas la totalité des réserves calciques et magnésiennes, la différence entre formes échangeables et non-échangeables est vraisemblablement sous-évaluée).

Etudiant des sols oxiques de Sierra Leone, MOKWUNYE et MELSTED (1972) constatent que les réserves magnésiennes non-échangeables constituent de 75 à 95 % du magnésium total.

Afin de ne pas surcharger cet exposé, le lecteur trouvera plus loin (tableau VIII.15.) un certain nombre de données chiffrées permettant de penser, en dépit de méthodes d'analyses différentes, que les réserves calciques sont habituellement proportionnellement nettement moins importantes que les réserves magnésiennes dans les sols ferrallitiques.

Forme des réserves calciques et magnésiennes

Lorsque les sols sont encore jeunes et peu profonds, il reste souvent des minéraux de la roche-mère dans le profil et on conçoit qu'une analyse dite totale puisse extraire des quantités de calcium et de magnésium très supérieures aux valeurs de ces cations sous forme échangeable.

Lorsque l'évolution ferrallitique progresse, on voit mal sous quelles apparences peuvent se dissimuler calcium et magnésium non échangeables. Le talc et la serpentine résistent bien à l'altération, mais sont en définitive assez localisés géographiquement. Mais il s'agit là de substances magnésiennes. Aucun minéral primaire contenant du calcium ne supporte une pédogenèse un peu énergique, comme la pédogenèse ferrallitique.

Quant aux formes secondaires de réserve de ces deux éléments, on a invoqué une complexation du magnésium sous forme non échangeable par la matière organique ; en fait, il fut montré à propos des oxisols de Sierra Leone que les quantités mises en jeu étaient infimes par rapport à l'ensemble des réserves, bien qu'elles ne soient pas négligeables si on les compare seulement au magnésium échangeable (MOKWUNYE et MELSTED, 1972).

L'hypothèse la plus vraisemblable paraît ressortir d'un certain nombre de travaux cités par SALMON (1963) : les silicates du sol peuvent contenir du magnésium, alors que, minéralogiquement, ils ne devraient pas en posséder. En effet, des substitutions permettent au magnésium de remplacer partiellement l'aluminium dans leur réseau cristallin. Il est certain que ce phénomène joue dans le cas de l'illite, toujours présente bien que le plus souvent en très faible quantité dans les sols ferrallitiques et surtout pour la muscovite si fréquente dans les profils (selon SALMON, op. cit., la muscovite pourrait contenir jusqu'à 17 % de magnésium).

On peut ainsi faire des hypothèses sur les combinaisons de corps dans lesquelles se dissimule le magnésium non-échangeable du sol. Mais on en est réduit pour le calcium à un certain nombre de suppositions faisant intervenir la complexation par la matière organique, des enrobements par les colloïdes, etc.

Un fait pourtant se dégage : les *réserves calciques sont plus faibles proportionnellement et apparemment plus fragiles que les réserves magnésiennes.*

6.3. METHODES D'ANALYSE DU CALCIUM ET DU MAGNESIUM

Calcium et magnésium totaux

On ne peut obtenir la totalité de ces éléments présents dans le sol que par attaque du sol par des réactifs énergiques : acide perchlorique, fusion alcaline, mélange fluo-perchlorique...

Pour les sols ferrallitiques évolués dans lesquels il ne reste aucune trace de roches ni de minéraux primaires, l'attaque à chaud dite aux trois acides (chlorhydrique, sulfurique, nitrique en mélange ; CLAISSE, 1968) communément employée en pays francophones est généralement suffisante, le résidu se composant alors uniquement de quartz (sinon, on reprend ce résidu par le réactif fluo-perchlorique). MOKWUNYE et MELSTED (1972) ont utilisé pour l'extraction du magnésium total la méthode de JACKSON (1962) très voisine dans son principe (mélange d'acides nitrique, phosphorique, chlorhydrique).

Ces méthodes ont l'inconvénient d'être longues, délicates (1) et parfois même dangereuses (attaque fluo-perchlorique). En outre, elles extraient la totalité des éléments minéraux, y compris ceux qui ne peuvent servir à la nutrition des plantes.

Aussi, les agronomes ont-ils cherché des tests plus rapides et plus simples qui donneraient un ordre de grandeur des réserves utilisables à échéance plus ou moins lointaine. L'école française utilise l'attaque nitrique (on fait bouillir le sol dans un large excès d'acide nitrique concentré pendant cinq heures) et donne improprement l'appellation d'« éléments totaux du sol » aux produits ainsi obtenus. L'inconvénient de cette méthode

(1) Il est fréquent que les chiffres de calcium obtenus par attaque aux trois acides soient discutables, parce qu'apparemment trop élevés.

est que le résultat dépend dans une certaine mesure des conditions d'attaque et n'est pas toujours aisément reproductible ; c'est d'ailleurs plus vrai pour le potassium que pour le calcium et le magnésium.

A ce type de test se rattachent les attaques à chaud (plus rarement à froid) par les acides chlorhydrique, sulfurique ou nitrique, méthodes surtout utilisées par les auteurs anglo-saxons pour l'extraction du potassium, mais qui peuvent s'appliquer également au calcium et au magnésium comme le rapporte COULTER (1972) à propos des sols de Malaisie.

Calcium et magnésium échangeables

Il existe en gros deux types de méthodes, l'extraction par les acides dilués et l'extraction par l'acétate d'ammoniaque.

Extraction par les acides dilués

L'acide chlorhydrique dilué fut utilisé longtemps au Zaïre pour la détermination rapide de la somme des bases échangeables, un titrage par la soude permettant de connaître l'acidité neutralisée par les bases du sol. Malheureusement, l'acide chlorhydrique extrait du fer et de l'aluminium en même temps que les bases alcalines et alcalino-terreuses, d'où l'inconvénient d'une erreur systématique par excès.

Le mélange d'acide sulfurique et chlorhydrique dilués (H_2SO_4 . 0,025 N + HCl . 0,1 N) préconisé par la North Carolina University est actuellement très employé en Amérique du Sud et en particulier au Brésil. Comme précédemment, on extrait une certaine quantité de fer et d'aluminium, ce qui est ici sans importance du fait que tous les éléments sont dosés séparément.

ROBINSON et SEMB (1968) ont ajouté à cette liqueur d'extraction du charbon actif sans qu'apparemment les résultats obtenus sur les sols de Tanzanie subissent des modifications sensibles.

Le mélange acide acétique — lactate de NH_4, mis au point pour l'Europe du Nord (EGMER, RIEHM, DOMINGO, 1960), fut transposé en Tanzanie par ROBINSON et SEMB (op. cit.), mais n'y a pas manifesté une supériorité quelconque sur les autres méthodes ; au contraire même, la faiblesse des quantités extraites rend assez délicate l'interprétation des résultats.

Extraction par l'acétate d'ammoniaque neutre et normal

C'est la méthode la plus utilisée et qui sert de référence à toutes les autres, à tel point qu'une détermination de bases échangeables mentionnée sans indication d'un procédé analytique précis est à coup sûr effectuée à l'acétate d'ammoniaque. Cette méthode tend à se généraliser et à supplanter toutes les autres. Il suffit pour s'en rendre compte de consulter la littérature récente concernant la chimie des sols.

On lui a prêté un défaut pour la détermination du calcium et du magnésium des sols : en effet, elle peut extraire ces éléments à partir de minéraux en voie d'altération lorsque la destruction de l'édifice cristallin est assez avancée pour qu'ils n'y soient plus retenus que par des liaisons du type valence. Un agronome pourra penser que cette distinction est bien subtile : ce calcium et ce magnésium, ayant alors toutes les caractéristiques chimiques des éléments échangeables des colloïdes, devraient être tout aussi accessibles aux plantes.

En fait, le principal inconvénient de l'utilisation de l'acétate d'ammonium neutre et normal tient à sa neutralité ; les sols traités le sont à pH 7 quel que soit leur pH réel « in situ » ; du fait de la diminution des charges électro-négatives des colloïdes amphotères (kaolinite, matière organique...) au fur et à mesure que le pH s'abaisse, la détermination de la capacité d'échange que l'on fait habituellement en même temps que la mesure des cations échangeables présente une erreur par excès dans les sols acides, erreur qui peut être importante lorsque les sols sont au voisinage de point iso-électrique (pH proches de 4 pour les sols à kaolinite). Pour remédier à ceci, on tamponne parfois l'acétate d'ammoniaque au pH du sol).

Quoi qu'il en soit de cette « erreur » sur la capacité d'échange, elle n'a aucune incidence sur l'extraction et la mesure des cations échangeables.

Fractionnement du calcium et du magnésium des sols tropicaux

MOKWUNYE et MELSTED (1972) étudiant des sols de Sierra Leone, du Viet-Nam et de Thaïlande, ont proposé pour le magnésium le fractionnement suivant :

— Magnésium total : attaque à l'acide perchlorique ($HClO_4$) à 70 % suivant la méthode proposée par JACKSON (1962).

— Magnésium échangeable : extraction à l'acétate d'ammonium normal et neutre (20 ml de réactif par gramme de sol pendant 40 à 80 minutes).

— Magnésium complexé avec la matière organique : on oxyde avec de l'eau oxygénée à 10 % le résidu de l'extraction précédente et on mesure, après centrifugation, le magnésium solubilisé après une nouvelle extraction à l'acétate d'ammoniaque.

— Magnésium acido-soluble : le résidu est repris, en ébullition douce, par de l'acide nitrique N (30 ml par gramme de sol) pendant 15 minutes, et on lave ensuite le résidu par de l'acide nitrique 0,2 N.

— Magnésium minéral : le résidu, transféré dans un bécher, est mis à digérer à chaud dans un mélange d'acides forts (nitrique, chlorhydrique, phosphorique). On reprend ensuite par HCl 5 N.

Pour être complet, il faudrait ajouter le magnésium contenu dans la solution du sol ; comme il est toujours en équilibre plus ou moins instantané avec le magnésium échangeable, on a l'habitude de le confondre avec ce dernier.

Il doit être possible d'appliquer au calcium un tel fractionnement, mais peu d'auteurs semblent l'avoir fait. Quoi qu'il en soit, les agronomes s'attachent surtout à deux données essentielles, éléments échangeables et éléments totaux, la différence formant la réserve calcique et magnésienne des sols dont une partie est éventuellement utilisable à terme par les plantes.

TABLEAU VIII.14. — *Fractionnement du magnésium dans quelques sols africains et asiatiques d'après MOKWUNYE et MELSTED (1972)*

	Profondeur cm	Total mé/100 g	Magnésium		Echangeable mé/100 g	Organique mé/100 g
			minéral	acido-soluble		
		SIERRA LEONE				
Série Moa	0-15	6,99	4,11	2,22	0,30	0,12
(Fluventic oxic	15-80	6,99	4,72	1,65	0,12	0,07
Dystropept)	80-150	6,17	4,94	1,03	0,13	0,07
Série Pendembu	0-18	3,29	2,47	0,82	0,17	0,07
(Tropectic Haplustox)	18-45	3,21	2,47	0,60	0,13	0,06
	95-140	3,60	2,57	0,49	0,10	0,06
Série Benjema (Aquic	0-10	6,01	4,94	0,62	0,44	0,15
Plinthic Haplustox)	10-38	6,25	5,35	0,60	0,21	0,06
	38-64	7,16	6,40	0,58	0,22	0,07

	Profondeur cm	total mé/100 g	Magnésium		Echangeable mé/100 g	Organique mé/100 g
			minéral	acido-soluble		
		SIERRA LEONE (suite)				
Série Modondé (Plinthic Haplustox)	0-13	5,96	4,11	0,80	0,37	0,10
	13-38	7,82	6,17	0,66	0,13	0,06
	38-76	9,05	8,02	0,66	0,10	0,07
	76-100	13,16	11,28	0,66	0,13	0,07
	100-150	11,52	10,58	0,49	0,12	0,06
Série Makent (Typic Haplorthox)	0-25	3,29	1,01	0,99	1,11	0,16
	25-50	3,50	2,20	0,82	0,23	0,10
	50-170	3,67	2,68	0,41	0,28	0,08
Série Tubum (Entic Oxic Dystropept)	0-11	2,88	1,65	0,58	0,37	0,10
	11-34	3,36	2,47	0,66	0,16	0,07
	34-64	3,72	2,88	0,66	0,12	0,06
Série Bosor (Typic Humbriorthox)	0-24	2,88	1,96	0,66	0,24	0,08
	24-45	3,13	2,26	0,62	0,13	0,06
	45-60	2,74	2,06	0,49	0,11	0,06
Série Mabassia (Entic Dystropept)	0-17	3,18	2,06	0,90	0,74	0,12
	17-63	3,53	2,47	0,74	0,25	0,07
	63-99	2,56	1,85	0,49	0,19	0,06
		VIET-NAM				
Phu Vink, Sandy Poam (Eutric Xerochrept)	0-10	13,16	7,20	0,82	2,88	0,14
	10-24	11,11	6,98	0,62	2,67	0,11
	24-35	22,21	10,80	3,29	7,30	0,23
	35-50	27,97	12,34	4,94	9,46	0,40
	50-70	19,33	6,99	6,17	5,97	0,49
	70-90	23,86	7,82	6,79	6,84	0,46
Cal San Clay (Dystric Humaquept)	0-25	37,02	26,74	2,10	9,46	0,30
	25-49	40,31	26,72	3,27	9,46	0,19
	49-81	41,13	27,15	4,61	9,87	0,12
	81-98	42,78	27,77	6,07	9,46	0,11
	+ de 98	48,54	27,97	9,67	12,75	0,13
Phy Vinh Loam (Eutric Xero-chrept)	0-19	13,88	9,05	4,11	0,82	0,07
	19-32	9,46	7,40	1,03	0,80	0,07
	32-45	9,05	7,40	1,32	0,64	0,06
	45-61	10,69	8,23	1,23	0,64	0,06
	61-76	11,52	9,05	2,47	0,58	0,08
	76-99	13,16	9,05	2,55	0,82	0,06
Red Yellow Podzolic (Ultisol)	0-24	20,16	13,56	4,28	0,95	0,13
	24-36	13,16	9,85	1,65	0,58	0,16
	36-60	13,16	10,87	1,15	0,61	0,14
	60-100 +	15,63	12,69	1,48	0,70	0,16
Old Alluvium (Alfisol)	0-13	3,21	2,29	0,49	0,40	0,05
	13-21	4,36	3,94	0,58	0,54	0,07

TABLEAU VIII.15 — *Teneurs de quelques sols ferrallitiques en calcium et magnésium échangeables et totaux*

I — Bases totales déterminées après attaque aux trois acides. Bases échangeables par extraction à l'acétate d'ammoniac neutre et normal (sur sol tamisé à 2 mm).

(*in* ESCHENBRENNER (V.) et BADARELLO (L.), 1975. Notice explicative de la carte des paysages morphopédologiques. Feuille d'Odienné à 1/200 000. Côte d'Ivoire. Doc. ORSTOM, Côte d'Ivoire, 96 p.)

	Profondeur en cm	Ca échang. mé/100 g	Ca total mé/100 g	Mg échang. mé/100 g	Mg total mé/100 g
Sol ferrallitique remanié modal	0-10	0,18	n.d.	0,54	n.d.
	15-20	0,45	n.d.	0,30	n.d.
	50-70	0,51	0,90	0,24	7,30
	160-180	0,72	0,85	0,15	7,00
Sol ferrallitique remanié induré	0-10	9,18	n.d.	3,42	n.d.
	20-30	0,93	n.d.	0,33	n.d.
	30-50	0,30	0,50	0,09	10,50
Sol ferrallitique remanié faiblement appauvri (en argile)	0-8	2,38	n.d.	1,52	n.d.
	15-30	0,51	n.d.	0,68	n.d.
	50-70	0,16	0,62	0,32	4,95
	130-160	0,18	0,67	0,36	12,80
	200-210	0,13	0,92	0,22	8,05
	290-310	0,13	0,82	0,12	5,90
	390-410	0,08	0,97	0,02	6,00
Sol ferrallitique appauvri (en argile) modal	0-10	3,30	n.d.	1,44	n.d.
	35-45	1,44	n.d.	0,66	n.d.
	65-75	1,35	2,00	0,60	6,45
	140-160	1,40	1,55	0,36	5,20
	250-280	1,20	1,20	0,15	4,30
Sol ferrallitique appauvri (en argile) hydromorphe	0-10	0,90	n.d.	0,30	n.d.
	30-60	0,50	n.d.	0,22	n.d.
	70-90	0,60	1,35	0,15	6,00
	120-140	0,65	1,70	0,20	5,20
	200-220	0,70	1,60	0,24	5,20
Sol ferrallitique rajeuni, avec érosion et remaniement	0-10	2,39	n.d.	1,28	n.d.
	25-35	0,74	n.d.	0,58	n.d.
	50-70	1,24	1,92	1,04	8,10
	110-130	0,49	1,07	0,68	7,25
	180-200	0,31	1,37	0,20	9,30
Sol ferrallitique typique faiblement rajeuni	0-10	2,94	n.d.	1,37	n.d.
	40-60	0,84	1,42	0,45	14,80
	100-120	1,21	1,42	0,45	9,95
	170-190	0,76	1,12	0,37	12,50
Sol ferrallitique typique faiblement remanié	0-10	3,99	n.d.	1,81	n.d.
	20-30	1,64	n.d.	1,04	n.d.
	50-70	1,24	1,37	0,81	7,25
	130-150	1,09	1,12	0,45	6,25

II — Bases totales déterminées après attaque à l'acide nitrique concentré et bouillant. Bases échangeables par extraction à l'acétate d'ammoniac neutre et normal (sur sol tamisé à 2 mm).

a) Côte d'Ivoire *in* ROOSE (E.J.) et JABIN (P.), 1969. Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à cacao de moyenne Côte d'Ivoire. Station IFCC près de Divo. I - Milieu, dispositif et résultat des campagnes 1967-1968. Rapport ORSTOM-IFCC (Abidjan), 76 p. ronéo.

	Profondeur en cm	Ca échang. mé/100 g	Ca total mé/100 g	Mg échang. mé/100 g	Mg total mé/100 g
Sol ferrallitique moyennement désaturé	0-1	11,07	14,25	2,90	5,02
	1-10	1,95	2,72	1,60	4,32
	20-50	0,90	1,28	0,68	2,84
	50-65	1,11	1,26	0,65	2,58
	80-100	0,28	0,53	0,66	1,68
	125-135	0,13	0,21	0,651	2,02
	175-200	0,08	0,86	0,33	1,28
	240-260	0,10	0,53	0,18	2,04

b) Congo, Vallée du Niari *in* BOISSEZON (P. de), 1967. Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari. I - Etude pédologique de la vallée du Niari. ORSTOM (Paris) Edit., 188 p.

	Profondeur en cm	Ca échang. mé/100 g	Ca total mé/100 g	Mg échang. mé/100 g	Mg total mé/100 g
Sol ferrallitique fortement désaturé modal	0-10	1,95	3,0	0,17	0,75
	70	0,11	1,1	traces	1,17

6.4. METHODES PERMETTANT D'ESTIMER CALCIUM ET MAGNESIUM ASSIMILABLES A TERME

Extraction aux acides dilués

Les auteurs anglo-saxons ont tenté de définir, en plus des éléments échangeables, une fraction dite « difficilement échangeable », extractible aux acides dilués, soit acide nitrique dilué (méthode de HAYLOCK, 1956), soit acide sulfurique dilué (méthode de HUNTER et PRATT, 1957).

Ils ont en outre caractérisé des éléments « fixés » extractibles aux acides forts, généralement par attaque du sol pendant deux à trois heures par de l'acide chlorhydrique 6 N.

Si ces méthodes furent largement appliquées au potassium, elles ne paraissent n'avoir que fort peu concerné le calcium et le magnésium. Toutefois, COULTER (1972) signale que la majorité des sols à hévéa de Malaisie ont entre 1 et 3 milliéquivalents de magnésium extractible à l'acide chlorhydrique 6 N, les sols sur basalte et sur alluvions étant plus riches.

Par contre, MOKWUNYE et MELSTED (op. cit.) ont extrait un magnésium « acido-soluble » par ébullition douce de 15 minutes dans de l'acide nitrique normal d'un sol préalablement débarrassé de ses bases échangeables (tableau VIII.14.).

L'école française s'en tient généralement au calcium et au magnésium improprement appelés « totaux » obtenus par ébullition pendant 5 heures d'un sol dans l'acide nitrique concentré. Cette méthode a permis à FAUCK, MOUREAUX et THOMANN (1969) de constater dans les sols de Casamance la faiblesse de la réserve calcique (1 à 2 mé/100 g), contrairement à l'ampleur des réserves magnésiennes (13 à 14 mé/100 g) et la diminution de ces réserves après 15 ans de culture, diminution peu significative pour le magnésium, mais très sensible pour le calcium qui tombe à 0,5 milliéquivalent pour 100 grammes de sol.

Calcium labile

Les procédés isotopiques, largement utilisés dans le cas du phosphore, furent aussi parfois employés pour le calcium des sols en particulier. Parmi les travaux effectués, on peut citer ceux de MAZOZERA et BOUYER (1971) sur un sol ferrugineux tropical sableux du Niger et sur des sols ferrallitiques sur gneiss et basalte de Madagascar, et de DENNIS et TRUONG BING (1974) sur les terres de Barre du Dahomey.

L'inconvénient de ce procédé réside dans la nécessité de prévoir un temps d'équilibrage entre le calcium du sol et l'isotope marqué, de durée variable mais parfois très longue, uniquement pour retrouver le chiffre du calcium échangeable ; une semaine pour le sol du Niger et le sol sur gneiss de Madagascar, mais seulement une journée pour le sol sur basalte. La cause de cette variabilité reste mal connue ; les auteurs pensent qu'elle est probablement en relation avec la nature des colloïdes absorbants et peut-être également avec des phénomènes d'enrobement de l'argile par de l'humus ou d'autres substances.

En outre, la valeur L de LARSEN étudiée par NEWBOULD et RUSSEL (1963) et DENNIS et TRUONG BINH (op. cit.) n'est pas stable si on ajoute au sol des nutriments minéraux (N.P.K.) qui favorisent la croissance des plantes et, par voie de conséquence, des prélèvements accrus en calcium et magnésium.

Malgré ces difficultés, ces expériences permettent de se rendre compte qu'une partie des réserves calciques peut être utilisée à terme par les plantes dans une proportion non négligeable. Ainsi, dans l'expérience de DENNIS et TRUONG BING (op. cit.), trois coupes de Ray-gras ont exporté en douze semaines 585 ppm de calcium, alors qu'il n'y avait au départ que 202 ppm de calcium échangeable.

6.5. RECAPITULATION

Si l'on s'en tient à la séparation classique entre calcium et magnésium échangeables d'une part, non échangeable ou de réserve d'autre part, on est amené à formuler pour les sols ferrallitiques un certain nombre de constatations d'ordre général.

1) La capacité de sorption des bases par le complexe d'échange est habituellement assez basse. Ceci est dû en particulier à la dominance assez générale des argiles kaolinitiques dans la majorité de ces sols, encore qu'il faille faire une différence entre kaolinite *sensu stricto* et halloysite. A noter que la matière organique introduit une forte capacité d'échange supplémentaire, proportionnelle à ses teneurs dans les sols.

2) La saturation du complexe absorbant par le calcium est extrêmement variable ; elle peut aller dans les sols ferrallitiques de 1 % à 90 %. Mais les cas de désaturation avancée sont fréquents sous climat humide, même en l'absence de cultures continues.

3) Si les réserves en magnésium des sols (Mg non-échangeable) sont habituellement importantes, le calcium non-échangeable apparaît faiblement représenté par rapport à sa fraction échangeable.

4) On n'a en définitive que fort peu de données sur l'intensité de la transformation des « réserves » en Ca et Mg échangeables. Malgré tout, il semble que les « réserves » calciques

des sols pédologiquement évolués soient plus facilement mobilisables, mais s'épuisent plus vite que les « réserves » magnésiennes dès qu'il y a culture.

7. LES FORMES DE L'ALUMINIUM (1)

7.1. GENERALITES

L'aluminium est au même titre que la silice et le fer l'un des constituants essentiels des sols et particulièrement des sols ferrallitiques qui peuvent présenter des horizons fortement enrichis en cet élément. A titre indicatif, kaolinite et gibbsite contiennent respectivement 39,5 % et 65,5 % d'Al_2O_3.

L'aluminium peut se présenter sous diverses formes dans les sols : silicates d'alumine, oxydes et hydroxydes sous forme amorphe ou plus ou moins bien cristallisés, aluminium ionique fixé sur le complexe d'échange.

Les chimistes, de leur côté, ont défini un certain nombre de catégories répertoriées par SEGALEN (1973) en fonction des méthodes utilisées pour l'extraction :

— aluminium total,

— aluminium « libre », en fait surtout les hydroxydes,

— aluminium « extractible », qui concerne les formes que l'on peut extraire par un réactif doux,

— aluminium échangeable fixé sur le complexe absorbant,

— aluminium complexé par la matière organique.

7.2. L'ALUMINIUM TOTAL

L'attaque et la mise en solution de toutes les combinaisons de l'aluminium, en particulier des silicates d'alumine y compris les plus résistants, suppose la mise en jeu de réactifs extrêmement puissants.

On fait appel généralement à la fusion dite alcaline (SEGALEN, 1973), soit fusion vers 500° avec soude ou potasse, soit fusion avec des carbonates alcalins (carbonate de sodium, ou carbonate double de sodium et de potassium), soit fusion à haute température avec des composés du bore : acide borique, méta- et tétra-borate de sodium ou de lithium employés en mélange avec des carbonates ou des fluorures, soit fusion oxydante à 400° avec le peroxyde de sodium. Ces fusions sont des opérations longues et onéreuses.

Connaître de façon exacte la totalité de l'aluminium n'est pas normalement nécessaire dans l'étude d'un sol. On peut se contenter très souvent de déterminer l'alumine des composés secondaires : les procédés de minéralisation à chaud aux acides forts donnent alors une assez bonne approximation en décomposant totalement argiles et hydroxydes et en respectant plus ou moins les minéraux des roches :

---

(1) Cette étude s'inspire largement de la monographie de SEGALEN (1973) « l'Aluminium dans les sols ». Le lecteur désireux d'approfondir ses connaissances sur l'aluminium du sol et de compléter ses références bibliographiques s'y reportera avec fruit.

— mélange aux trois acides, nitrique, sulfurique et phosphorique (CLAISSE, 1968), réputé pour conserver les minéraux primaires en grande partie, sinon en totalité,

— mélange d'acides sulfurique et fluorhydrique (BLANCHET et MALAPRADE, 1967) ; seuls les minéraux les plus résistants, corindon, spinelles, tourmaline, ne sont pas ou sont incomplètement attaqués,

— l'acide perchlorique souvent en mélange avec l'acide fluorhydrique (EVANS, 1967) : cette attaque, très énergique, a une efficacité qui se rapproche de celle des fusions alcalines.

D'autres techniques, comme l'injection dans un brûleur de spectrophotomètre ou l'exploration par des sondes électroniques (sonde de CASTAING) peuvent rendre de grands services dans des cas particuliers, mais sur le plan quantitatif leur précision reste faible (SEGALEN, 1973).

7.3. L'ALUMINIUM LIBRE

On inclut habituellement sous cette dénomination les hydroxydes d'aluminium, qu'ils soient cristallisés ou amorphes. Les procédés d'extraction proposés font appel surtout à la soude diluée et chaude (LELONG et *al.*, 1967) avec le risque de dissoudre l'aluminium interfoliaire et d'attaquer les réseaux argileux, à l'acide oxalique à 2 % (GASTUCHE et *al.*, 1957) ou encore avec une solution neutre de tartrate d'ammonium et d'oxalate d'ammonium (CHABANNES et BARBIER, 1950).

La distinction entre hydroxydes amorphes et cristallisés se heurte au manque de spécificité des réactifs utilisés. L'un des procédés mis au point pour les séparer est celui de SEGALEN (1968) qui effectue des traitements répétés d'acide chlorhydrique 8 N et de soude 0,5 N en alternance.

7.4. ALUMINIUM EXTRACTIBLE

Ce vocable regroupe les formes d'aluminium extraites par les réactifs doux les plus divers. Cette définition implique donc une absence de précision assez décevante et la multiplicité des dénominations ajoute encore à la confusion. Avec SEGALEN (1973), on essaiera de classer ces dernières en fonction des réactifs d'extraction :

— L'aluminium échangeable est celui qui est extrait par des sels neutres : chlorures de potassium surtout, mais aussi de calcium et d'ammonium, acétate de baryum, citrate de sodium, etc. Etant donné son importance, il fera l'objet du paragraphe suivant de cette étude.

— L'aluminium extractible *sensu stricto* : on peut utiliser les sels précédents, mais à réaction acide (pH entre 3,0 et 4,8). Mais c'est surtout l'acétate d'ammonium à pH tamponné à une valeur bien déterminée (entre 4,0 et 5,0) qui fut le plus fréquemment employé (MC LEAN et *al.*, 1964).

— L'aluminium actif : on réserve parfois cette appellation à l'aluminium mesuré après action du réactif de MORGAN (1937), soit un mélange acétate de sodium-acide acétique tamponné à pH 4,8.

— L'aluminium mobile : c'est celui qui est déterminé après action de l'acide sulfurique dilué ou encore de composés alcalins, comme la soude, le pyrophosphate de sodium, le fluorure de sodium. Les quantités extraites sont assez nettement supérieures à celle de l'aluminium extractible. A noter que le qualificatif « mobile », s'il implique une mobilisation par des agents chimiques, ne présuppose aucune mobilité particulière dans le sol en conditions normales.

— L'aluminium interfoliaire : il s'agit surtout de formes hydroxylées ($AL(OH)^{++}$ et $AL(OH)_2^{+}$) et aussi d'aluminium ionique fortement fixé, localisés dans les espaces interfoliaires des argiles de type smectite, illite et chlorite... Il n'en sera pas question ici, étant donné que ces argiles sont fort mal représentées dans les sols ferrallitiques (consulter SEGALEN, 1973, p. 110),

— L'aluminium extrait par l'eau (chaude ou froide) : seuls les minéraux argileux et les alumino-silicates amorphes présentent une certaine solubilité à l'eau. Cette méthode, surtout utilisée lors des études sur l'altération, n'est pratiquement jamais employée dans la pratique agronomique courante.

7.5. ALUMINIUM ECHANGEABLE

On sait depuis les travaux de VEITCH (1904) que l'aluminium a la propriété de se fixer sous forme ionique sur le complexe absorbant des sols de réaction acide où il remplace progressivement les ions H^+.

Or, la présence de cet aluminium induit et favorise des toxicités redoutables pour les plantes cultivées (SEGALEN, 1973 ; BOYER, 1976), d'où l'intérêt manifesté pour sa détermination.

Nature de l'aluminium échangeable

Le fait que l'aluminium déplacé par les divers réactifs utilisés passe en solution sous forme Al^{+++} ne permet absolument pas de déduire qu'il existe toujours dans le sol sous cette forme ; par exemple, les ions H^+ libérés des sites d'échange peuvent réagir sur les hydroxydes (BLANCHET et *al.*, 1960).

$$Al(OH)_2^{+} + 2\,H \rightleftharpoons Al^{+++} + 2\,H_2O$$

Toutefois, il apparaît à peu près certain que pour des pH de 4,0 ou inférieurs à cette valeur, tout l'aluminium mobilisé se trouvait effectivement sous forme ionique Al^{+++}. Mais si on élève progressivement le pH de 4,0 à 5,0, des réactions d'hydrolyse se produisent avec formation de composés hydroxylés du type $Al(OH)^{++}$ et $Al(OH)_2^{+}$. Il s'agit là d'une schématisation, peut-être abusive, car les travaux de BROSSET et RAUPACH (1) tendent à accorder une place importante à l'hexamère $Al_6(OH)_{15}^{+++}$, tandis que SIVASUBRAMANIAN et TALIBUDEEN (1972) parlent de polymères plus complexes du genre $[Al(H_2O)_6]_3$ et $[Al(H_2O)_5\ OH]_2$. Ce n'est que pour un pH au minimum légèrement supérieur à 5,0 que tout l'aluminium passe sous forme d'hydroxyde neutre $Al(OH)_3$ lequel n'est pas pris en compte par les méthodes habituelles d'extraction. Le fait d'appliquer à tous les composés alumineux extraits la valence 3 conduit donc à une erreur systématique lorsqu'il s'agit d'évaluer la quantité de cations nécessaire à la neutralisation de cet aluminium.

En fait, cette surestimation se révèle parfaitement acceptable dans la pratique agronomique courante ; DALAL (1975) calcule que Al trivalent représente, par rapport à l'aluminium mis en solution, 90 % à pH 4,05 et 80 % à pH 4,25 et ESPIAU et PEYRONEL (1976) estiment que, jusqu'à pH 4,7, l'affectation d'une valence 3 à tout l'aluminium dit échangeable est tout à fait admissible.

Comme la simple neutralisation de l'aluminium échangeable par des cations alcalino-terreux, si elle élimine toute toxicité, ne relève pas le pH et que c'est précisément ce relèvement du pH qui est recherché (pour éviter une réapparition des accidents), il est avantageux de calculer largement les doses. Il n'y a donc aucun inconvénient à surévaluer un peu l'aluminium échangeable.

---

(1) Cités par ESPIAU et PEYRONEL (1975).

Les réactifs d'extraction et leurs conditions d'emploi

La détermination de l'aluminium échangeable implique deux précautions essentielles soulignées par Mc LEAN (1965) :

— en raison de la forte énergie d'adsorption des cations aluminium, la concentration de la solution d'échange doit être assez élevée pour les déplacer en totalité,

— la solution doit maintenir les ions aluminium dans leur état cationique, donc ne pas les complexer et surtout ne pas modifier le pH.

On doit ajouter aussi qu'il importe que l'extraction ne soit ni trop longue, ni trop violente, pour ne pas prendre en compte en même temps de l'aluminium non échangeable.

Les sels neutres satisfont bien ces conditions : en particulier, l'échange s'effectue à un pH très voisin de celui du sol. Dans ce but, on utilise habituellement des chlorures de potassium, de calcium, de baryum et d'ammonium, sans d'ailleurs qu'il y ait de différence fondamentale entre eux. Si BLANCHET et *al.* (1960) attribuent une légère supériorité au chlorure d'ammonium par rapport au chlorure de baryum, IGUE et FUENTES (1972) trouvent que chlorures d'ammonium et de potassium, tous les deux en solution normale, extraient exactement les mêmes quantités d'aluminium. Toutefois, le chlorure de calcium aurait l'inconvénient, plus que les autres chlorures cités, d'englober une proportion plus importante d'aluminium hydroxylé (COLEMAN et *al.*, 1960).

En fait, c'est le chlorure de potassium qui se trouve être le réactif le plus couramment utilisé. On l'emploie habituellement en solution normale dans la proportion de 10 millilitres par gramme de terre (BACHE et SHARP, 1976 ; ESPIAU et PEYRONEL, 1976). Par contre, les temps de contact varient de façon considérable suivant les auteurs, de quelques minutes à plusieurs heures. C'est ainsi que les agronomes brésiliens prolongent le contact jusqu'à 24 heures pour leurs déterminations de routine et aboutissent vraisemblablement à une surestimation de l'aluminium échangeable. C'est le défaut inverse, sous-estimation probable, que l'on pourrait reprocher à certains auteurs anglo-saxons (temps de contact de quelques minutes à un quart d'heure), bien que l'aluminium échangeable passe très vite en solution. Officiellement, les américains (1) préconisent soit 30 minutes, soit 24 heures.

ESPIAU et PEYRONEL (1976), après une étude systématique des conditions expérimentales, conseillent de faire sur le même échantillon, 5 grammes de terre, deux extractions successives d'une demi-heure chacune, avec 50 millilitres de KCl.N chaque fois. C'est une méthode analogue, mais un peu plus nuancée, contact sol-solution d'une demi-heure, puis mise sur filtre et percolation, qui est utilisée aux laboratoires de l'ORSTOM.

Mesure de l'aluminium échangeable et de l'acidité du sol

Que l'on opère par contact sol-solution ou par percolation, le déplacement d'un ion aluminium par le potassium du chlorure s'accompagne de la libération d'ions d'hydrogène et de la formation d'un hydroxyde :

$$Al^{+++} + 3\ H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3\ H^+$$

Ces ions hydrogène viennent s'ajouter à ceux qui se trouvent normalement fixés sur le sol. Lorsqu'on titre le filtrat par la soude, on prend en compte l'acidité d'échange provenant de deux origines différentes. Pour lever cette indétermination, on complexe en plus l'aluminium par du fluorure de sodium sur un deuxième échantillon :

$$Al + 6\ NaF \rightarrow (AlF_6)Na_3 + 3\ Na^+$$

L'acidité mesurée est alors due uniquement aux ions hydrogène. Par différence, on obtient l'acidité due aux ions aluminium (SEGALEN, 1973).

---

(1) Soil Survey Investigation Report n° 1 du SOIL CONSERVATION SERVICE U.S. DEPARTMENT of AGRICULTURE.

L'école américaine (KAMPRATH, 1972) juge superflue cette différenciation et rassemble volontiers les ions Al et H sous la même appellation d'aluminium échangeable. Cette confusion, sans doute justifiée dans les sols très acides (pH < 4,5) où l'aluminium tend à occuper tous les sites d'échange laissés disponibles par les bases (COULTER, 1969), conduit parfois à des distorsions de l'ordre de 30 % par rapport à la méthode au fluorure.

A noter qu'une méthode élégante du dosage de l'aluminium consiste à mesurer directement, au spectrophotomètre de flamme, cet élément sur les filtrats après action du chlorure de potassium.

7.6. ALUMINIUM COMPLEXE PAR LA MATIERE ORGANIQUE

Comme beaucoup d'ions métalliques, l'aluminium se fixe sur la matière organique où il est énergiquement retenu sous forme de complexes. Les formes organo-aluminiques les plus fréquemment citées proviendraient de l'action des acides fulviques avec comme corollaire une mobilité certaine de l'aluminium dans le profil (TURENNE, 1975).

Bien que la forme de ces complexes soit encore mal connue, on peut mettre en évidence l'aluminium qui y est présent en retranchant de l'aluminium extrait par l'acétate d'ammonium à pH 4,8 l'aluminium échangeable ; on obtient une fraction dite « acide non échangeable » et cette fraction est en corrélation significative avec la teneur en matière organique (PIONKE et COREY, 1967).

Il est possible que l'aluminium adsorbé sur les sites d'échange de la matière organique (et à ce titre mesuré par les sels neutres) ait des propriétés intermédiaires entre l'« aluminium acide non échangeable » et l'aluminium échangeable *sensu stricto* : EVANS et KAMPRATH (1970) ont en effet remarqué que les ions aluminium passaient mal dans la solution du sol tant que le complexe d'échange des sols fortement organiques n'était pas saturé à plus de 60 % par l'aluminium. A pH égal, DUCHAUFOUR et SOUCHIER (1980) constatent que le complexe absorbant des sols organiques contient proportionnellement moins d'aluminium échangeable que celui des sols minéraux.

En définitive, malgré une certaine inertie de l'aluminium organique, on peut considérer en pratique qu'il est en quelque sorte en équilibre avec l'aluminium échangeable. En effet, la complexation des ions aluminium par la matière organique contribue nettement à réduire les toxicités aluminiques (dues au premier chef à l'aluminium échangeable) ; inversement, la minéralisation de la matière organique accroît fortement les effets nocifs de l'aluminium échangeable.

7.7. ALUMINIUM ECHANGEABLE ET EVALUATION DES BESOINS EN CHAUX DES SOLS

L'élimination des toxicités dues à l'aluminium échangeable des sols acides se fait très généralement au moyen d'amendements calciques ou calco-magnésiens (calcaires, dolomies, chaux calciques ou magnésiennes) qui favorisent la réaction d'hydrolyse suivante :

$$Al^{+++} + 3\ H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3\ H^+$$

L'aluminium agit donc comme un tampon acide (TRINH, 1976 ; BOYER, 1976) que le calcium (et le magnésium) doit neutraliser en premier lieu.

Quant aux quantités d'amendements préconisées, COLEMAN et *al.* (1958) conseillent de les calculer en fonction des teneurs d'aluminium échangeable présent dans le sol, milliéquivalent par milliéquivalent. De son côté, KAMPRATH (1970) recommande d'utiliser un coefficient de 1,5 pour les sols contenant entre 2 et 7 % de matière organique pour

éliminer entre 85 et 90 % de l'aluminium échangeable. Il est suivi en cela par les auteurs brésiliens qui, en fonction de la teneur en matière organique, font varier ce coefficient de 1 à 2 (COELHO et VERLENGIA).

Etudiant un certain nombre de sols d'Afrique Noire et de Madagascar, TRINH (1976) trouve qu'un milliéquivalent de calcium (sous forme de chaux), neutralise suivant le cas 0,44 à 0,76 milliéquivalent d'aluminium. Par contre, l'expérience menée par BRAMS (1973) en Sierra Leone sur des sols de terrasse alluviale (Plinthic distropept) suggérerait une efficacité du calcium (ici dû calcaire) voisine de l'unité.

Une telle distorsion peut provenir bien sûr des méthodes d'évaluation de l'aluminium échangeable quelque peu variables suivant les auteurs et selon les processus analytiques. Mais un autre facteur doit certainement entrer en jeu : les sols considérés sont toujours très acides, et se trouvent, de ce fait, souvent au voisinage du point iso-électrique. La simple élimination de l'aluminium échangeable, même sans relèvement significatif du pH, fait apparaître sur les colloïdes amphotères, et en particulier sur la matière organique, des charges négatives que le calcium doit également neutraliser (UEHARA et KING, 1975). Il est probable également que calcium et magnésium provoquent la dissociation, au moins partielle, des complexes organo-alumineux.

Comme dans la pratique agronomique courante on choisit, en fonction des cultures, un pH final généralement entre 5,0 et 5,5 auquel on se propose d'arriver, une expérimentation systématique sur une succession d'échantillons permet alors de déterminer la dose exacte d'amendements à apporter.

Un autre procédé permet d'évaluer d'un coup la charge globale du sol : il s'agit du chlorure de baryum tamponné à la triéthanolamine (MEHLICH, 1945 et 1960). On mesure le pH de la solution après action du réactif et, dans la pratique courante, des tables de conversion permettant d'évaluer la dose d'amendement à apporter en fonction du pH désiré pour le sol.

D'autres auteurs (SCHOEMACKER, MC LEAN et PRATT, 1961 ; ADAMS et EVANS, 1962 ; YUAN, 1974) proposent des formules un peu différentes, mais qui ressortent du même principe.

8. LES FORMES DES OLIGO-ÉLÉMENTS

8.1. METHODES ANALYTIQUES

Etant donné que cette famille d'éléments du sol est encore mal connue, il semble préférable de ne pas suivre, en ce qui les concerne, la présentation adoptée précédemment et de commencer par l'étude des processus analytiques qui permettent de les caractériser.

Les méthodes utilisées pour déterminer les oligo-éléments assimilables sont très nombreuses et pas toujours représentatives de l'assimilabilité réelle de ces éléments par les plantes.

AUBERT et PINTA (1971) citent :

- l'eau à 100° (pour le bore),
- la solution tampon acide oxalique-oxalate d'ammonium à pH 3,3 (Molybdène),
- l'acide chlorhydrique 0,1 N (Zinc),
- l'acétate d'ammonium à pH 7 (Cuivre, Zinc, Manganèse),
- l'acide acétique à 2,5 %, pH 2,5 (Manganèse, Cuivre, Zinc, Nickel, Cobalt),

— l'acide chlorhydrique et l'acide nitrique N (Cuivre, Zinc, Nickel, Cobalt).

La liste ci-dessus ne comprend que les processus analytiques les plus fréquemment utilisés par les chimistes. Mais il en existe bien d'autres, pas tout à fait autant que d'analystes mais presque. Par exemple, on peut citer pour le Manganèse :

— l'extraction à l'eau carbonatée (FRANQUIN, 1958), qui en principe reproduit l'action dissolvante des racines,

— le manganèse « actif » extrait au réactif acéto-acétique à pH 4,8 de BARBIER mélangé à 0,2 % de chlorhydrate d'hydroquinone (DUVAL et MAURICE, 1970).

Et il en est souvent ainsi pour presque tous les oligo-éléments.

Ainsi qu'on le verra plus loin (chap. X, p. 225 s.q.), l'assimilabilité des éléments traces varie énormément en fonction du milieu et en particulier du pH. On peut donc douter *a priori* de la validité pour les sols acides de méthodes faisant intervenir une solution à pH 7. Les acides faibles à pH 2,5 ou 3 et surtout tamponnés au pH du sol paraissent préférables.

8.2. FORMES DES OLIGO-ELEMENTS

On connaît souvent assez mal les formes sous lesquelles se présentent les oligo-éléments. Ceci provient évidemment de la faiblesse de leurs teneurs dans le sol qui ne permet pas toujours une approche analytique cohérente pour chacun d'eux. Mais il faut incriminer aussi la complexité des appellations qui parfois obscurcit le problème. Le cas du manganèse est particulièrement caricatural : on parle de manganèse total, hydrosoluble, échangeable, assimilable, actif, réductible, mobile, etc., chaque nom recouvrant le plus souvent le produit obtenu par une technique analytique donnée. On s'efforcera ici de simplifier au maximum ces dénominations et de déboucher, lorsque ce sera possible, sur un corps chimique bien caractérisé.

Le Bore

Le bore paraît pour une grande part fixé sous forme ionique ou complexée (chélates) sur la matière organique du sol. Les hydroxydes d'aluminium colloïdaux pourraient également adsorber énergiquement le bore. On distingue traditionnellement un bore total extrait par un réactif énergique (acide concentré et ou mélange sulfo-fluorhydrique ou fluo-perchlorique) d'un bore « soluble à l'eau chaude » (on laisse en contact pendant 10 à 15 minutes terre et eau bouillante (WEIR et JONES, 1970 ; OLIVER et *al.*, 1974).

Ce bore soluble à l'eau chaude apparaît comme un bon indicateur de l'assimilabilité de cet élément. MALAVOLTA (1967) indique pour les sols de l'Etat de São Paulo (Brésil), en majorité ferrallitiques, des teneurs en bore total de 31 à 54 ppm et en bore soluble entre 0,06 et 0,32 ppm. AUBERT et PINTA (1971) font état d'une limite inférieure à 2 ppm pour le bore total dans les sols des tropiques humides et d'un bore soluble de l'ordre de 1 à 3 % du bore total.

Le Cuivre

Il s'agit d'un élément retenu par les colloïdes argileux (il semble que sous forme de $Cu(H_2O)_6^{++}$ et $Cu(H_2O)_4^{++}$, il puisse entrer dans les cavités hexagonales des feuillets d'argile et même à l'intérieur des octaèdres, selon MC BRIDE et MORTLAND, 1974), mais surtout il est très fortement complexé par la matière organique par chélation.

Les teneurs en cuivre total peuvent varier fortement dans les sols ferrallitiques : de traces à 250 ppm (AUBERT et PINTA, 1971). Par exemple, 4 à 6 ppm dans les sols minéraux,

20 à 30 ppm dans les sols organiques sont des taux courants dans les sols de l'Etat de São Paulo au Brésil (MALAVOLTA, 1976) et d'ailleurs satisfaisants pour les plantes cultivées.

Quant au cuivre assimilable extrait par l'acide acétique à 2,5 %, il est compris entre 0,1 et 0,6 ppm dans les sols ferrallitiques désaturés cultivés en ananas de basse Côte d'Ivoire (GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL, 1976) sans carences apparentes.

Le Molybdène

Le molybdène peut se trouver dans les sols en tant que :

— molybdène non assimilable des minéraux,

— molybdène échangeable, soit l'ion MoO_4^{--}, fixé dans les cavités hexagonales des argiles, en particulier de l'halloysite (STOUT et *al.*, 1951),

— molybdène combiné à la matière organique,

— et enfin, le molybdène soluble de la solution du sol, en fait très peu abondant.

Quant aux formes chimiques exactes des molécules molybdéniques présentes dans le sol, elles sont mal connues. HOROWITZ (1978), s'appuyant sur les mesures de Eh et de pH faites sur 11 profils caractéristiques des sols du littoral de l'Etat du Pernambouc (Brésil), sols en majorité ferrallitiques, conclut que les ions MoO_2^{+} et $HMoO_4^{-}$ se trouvent certainement dans ces sols, que MoO_4^{--}, et MoO_2^{-} sont susceptible d'y exister, mais que MoO^{+++} et Mo_3O_8 ne devraient pas normalement s'y rencontrer.

Les teneurs en molybdène des sols ferrallitiques sont toujours très faibles : une étude exhaustive faite sur les sols du Zaïre indique (VAN COMPERNOLLE, STOOPS et KAYENGA, 1965) :

— molybdène total : 0,2 à 5 ppm,

— molybdène extractible (acide acétique à 2,5 %) : toujours inférieur à 0,2 ppm.

Notons également que, toujours inférieur à 0,2 ppm, le molybdène extractible ne peut être dosé sur les sols ferrallitiques fortement désaturés de basse Côte d'Ivoire, en raison de teneurs trop faibles (GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL, 1976) pour être significatives avec les procédés analytiques utilisés.

Le Manganèse

D'après COLINS et BUOL (1970) et CHENG et OUELETTE (1971), le manganèse existe dans le sol sous les formes suivantes :

— manganèse tétravalent, sous forme d'oxyde MnO_2,

— manganèse trivalent, surtout oxyde Mn_2O_3,

— manganèse bivalent, oxydes, hydroxydes ou ion Mn^{++}.

L'existence de l'oxyde Mn_3O_4 reste très discutée : on le considère le plus souvent comme la coexistence de MnO et MnO_2 dans le même sol. En fait, un équilibre, dépendant du pH mais aussi des conditions d'oxydo-réduction (Eh), régit les transformations entre ces formes (cf. chap. X, p. 226-231).

$$MnO_2 \rightleftharpoons Mn_2O_3 \rightleftharpoons MnO \text{ (ou } Mn^{++})$$

Il existe une corrélation nette entre le manganèse bivalent et le manganèse assimilable par les plantes à un pH donné, tout au moins pour la partie qui n'est pas complexée par la matière organique (car le manganèse subit de la part de la matière organique une chélation énergique). Notons que le manganèse tétravalent n'est pratiquement pas assimilable et que le manganèse trivalent ne l'est que dans la mesure où il se dissocie en MnO.

$$Mn_2O_3 \rightleftharpoons MnO_2 + MnO$$

Mais même le manganèse inassimilable MnO_2 est susceptible de se transformer en manganèse assimilable si les conditions de pH et Eh changent.

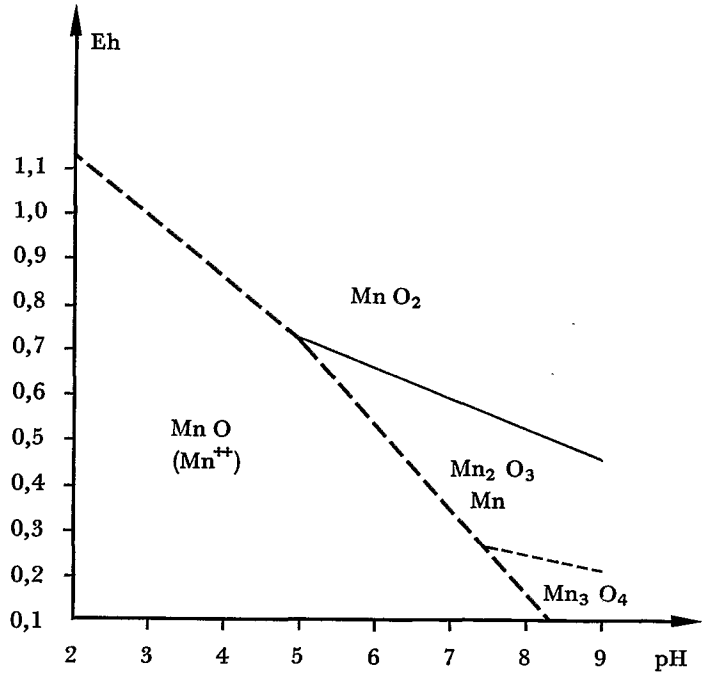


FIGURE 13

Formes du Manganèse en fonction du pH et du Eh d'après COLLINS *et* BUOL *(1970)*

Il était donc tentant, par des méthodes analytiques appropriées, de caractériser ces divers états du manganèse. D'où les nombreuses appellations du manganèse, dont la multiplicité ne simplifie par l'approche du problème. On retiendra ici, à ce propos, les méthodes analytiques les plus souvent utilisées :

— Manganèse hydrosoluble : extraction à l'eau distillée. Des quantités très faibles de Mn sont ainsi obtenues : 0,1-0,5 ppm.

— Manganèse extractible par l'acide acétique à 2,5 % et pH 2,5 (méthode de MITCHELL, 1948). On a préconisé aussi l'extraction par l'orthophosphate ammoniaqué $NH_4H_2PO_4$ .3 N (CHENG et OUELETTE, 1971).

— Manganèse échangeable par extraction à l'acétate d'ammoniaque neutre et normal. Etant donné la dynamique du manganese dans le sol, il peut sembler préférable de tamponner la solution d'extraction au pH du sol par adjonction d'acide acétique (FRANQUIN, 1958). Certains auteurs opèrent à pH acide constant, pH 3,3 par exemple.

— Manganèse réductible : on mélange à l'acétate d'ammoniaque normal de l'hydroquinone (CHENG et OUELETTE, op. cit.) et on espère par ce moyen déterminer la quantité de manganèse non assimilable susceptible de devenir rapidement assimilable.

— Manganèse « actif » appelé aussi « assimilable ». Manganèse actif = Manganèse échangeable + manganèse réductible (1).

Pour être complet, précisons que l'école française appelle Manganèse actif le manganèse extrait par le réactif acéto-acétique à pH 4,8 de BARBIER mélangé à 0,2 % de chlorhydrate d'hydroquinone (DUVAL et MAURICE, 1970).

Toutefois, TRUONG, WILSON et ANDREW (1961) se sont aperçus que, dans les sols du Queensland australien, le seul manganèse échangeable était beaucoup plus représentatif de l'assimilabilité réelle du manganèse par les plantes que le manganèse dit assimilable ou actif (Mn échangeable + Mn réductible).

(1) On ajoute parfois le manganèse hydrosoluble au Mn éch. et au Mn réductible pour avoir le manganèse actif.

– Manganèse total : il est déterminé après attaque du sol par un réactif énergique (acide fluoperchlorique, acides forts ou leur mélange).

– Manganèse lié à la matière organique : une partie importante du manganèse bivalent se trouve dans la nature liée à la matière organique ; effectivement, 93 % du manganèse existant dans la solution du sol se trouve sous forme organique (ELLIS et KNESEK, 1972). Bien que cette chélation soit susceptible de réduire les effets d'une éventuelle toxicité manganique, il paraît probable que les complexes ainsi formés possèdent un manganèse apte à devenir rapidement assimilable, car la combinaison Acide fulvique-Manganèse est peu stable (comparée à celles formées avec Cu, Zn, Fe, etc.) (SCHNITZER et SKINNER, 1967).

Teneurs en manganèse de certains sols ferrallitiques

Le tableau VIII.6. indique les teneurs en manganèse de quelques sols du Zaïre et de Côte d'Ivoire.

TABLEAU VIII.16. – *Manganèse dans les sols du Zaïre et de Côte d'Ivoire (VAN COMPERNOLLE, STOOPS, KAYENGA, 1965) (GODEFROY, LACOEUILHE, MARCHAL, 1976)*

	Manganèse total ppm	Manganèse extractible (Ac. acétique 2,5 %) ppm
Sols du Zaïre		
Ferralsols pauvres (en Mn)	40	1,6
Ferralsols riches "	250	15,0
Ferralsols pauvres "	120 à 100	100 à 20
Ferralsols riches "	160 à 800	100 à 30
Sols de Côte d'Ivoire		
Ferrallitique fortement désaturé	–	2 à 12

Au Queensland australien, TRUONG, WILSON et ADREW (1971) donnent les chiffres suivants (Mn en ppm) :

	Mn échangeable	Mn réductible	Mn assimilable
Série Goweie	18,5	74,1	92,6
Série Samford	16,0	152,8	168,8

En Afrique orientale, le manganèse extrait à l'acétate de NH_4 neutre et normal est généralement compris entre 5 et 100 ppm dans quelques sols pouvant contenir entre 100 et 300 ppm de manganèse total.

Les teneurs en manganèse total dépendent énormément de la roche-mère : ainsi, au Ghana, 100 à 350 ppm dans les sols sur granite, 2 000 à 3 000 ppm sur débris de roches basiques (AUBERT et PINTA, 1971).

De fait, des teneurs en manganèse total de 500 à 2 000 ppm paraissent fréquentes en sols ferrallitiques.

Le Zinc

Le zinc fait partie de ces métaux qui forment, en milieu hydraté, des hydroxydes se comportant comme des acides faibles ou des bases faibles suivant le pH du milieu environnant.

THORNE (1957) pense que la forme $HZnO_2^-$ est dominante en milieu acide, tandis que la forme ZNO_2^- le deviendrait en augmentant la concentration d'alcalis. Or, cette dernière forme se combine aisément avec le calcium du sol pour donner des composés peu solubles à pH 6,5-7,5, mais dont la solubilité augmente fortement à pH $\geqslant$ 8.

D'un point de vue plus agronomique, on préfère souvent suivre des nomenclatures du genre de celle établie par TILLER, HONEYSETT et de VRIES (1972) pour un certain nombre de sols autraliens, dont deux sols « latosolics » (ferrallitiques) :

— Zn faiblement adsorbé par le complexe absorbant, que l'on déplace par une solution très diluée de nitrate de calcium, 0,05 M.Ca $(NO_3)_2$, (environ 1 ppm de Zn).

— Zn fortement lié au complexe absorbant : on l'extrait soit par déplacement par un sel de magnésium (Cl_2Mg, SO_4Mg), Mg et Zn ayant des rayons ioniques voisins, soit par complexométrie (EDTA-Acétate de NH_4), soit encore par l'acide chlorhydrique dilué (HCl.0,1 N). Les quantités extraites par ces trois méthodes sont assez cohérentes pour les deux latosols : 1,30 à 3,3 ppm.

— Zn total extrait à HF : 9,4 ppm pour un latosol, 21,8 ppm pour l'autre.

Le plus souvent, on associe les deux premières catégories ci-dessus pour avoir un zinc dit extractible ou assimilable. On l'extrait globalement assez souvent par les réactifs suivants (l'extraction à HCl.0,1 N restant toutefois la plus employée) :

— acétate d'ammoniaque et ditizone, méthode de SHAW et DEAN (1952),

— EDTA-Carbonate de NH4, méthode de TRIERWEILER et LINDSAY (1969),

— HCl à pH 5 (0,2 N), méthode de DARTIGUES (1964).

Quant au zinc total, on l'obtient par l'action de divers réactifs HNO_3, HF, $HClO_4$, HCl...

Quelques teneurs en zinc des sols ferrallitiques

Au Brésil, VALADARES (1972) a déterminé les teneurs en zinc total de sols de l'Etat de São Paulo :

Terra Roxa	133 à 363 ppm	moyenne 186 ppm
Latossolos et solos podzólicos	35 à 59 ppm	moyenne 44 ppm
Arenito de Bauru	22 à 25 ppm	
Latossolos sableux	4 à 11 ppm	moyenne 9 ppm

A noter qu'il existe une bonne corrélation (r = 0,79) entre teneurs en Zn total et la richesse de ces sols en oxides et hydroxides de fer.

Quand au Zn assimilable ou extractible (HCl.0,1 N et Na_2.EDTA 1 %), il varie entre des traces et 9 ppm, les sols sableux étant les plus mal fournis. On a trouvé au Cameroun des teneurs de 4,2 ppm de Zn extrait par HCl 0,1 N pour des sols à cacaoyers (GESTIN et ROUX, 1974) et 5,4 ppm en Amazonie péruvienne (VILLACHIA et *al.*, 1974).

En fait, zinc total et zinc extractible peuvent varier considérablement comme le montrent les analyses faites dans les profils de sols ferrallitiques des Hawaï (tableau VIII.17).

TABLEAU VIII.17. — *Zinc total et zinc extractible sur quatre profils ferrallitiques des Hawaï d'après KANEHIRO et SHERMAN (1967)*

Classification Soil Toxonomy	Profondeur cm	pH	Zn total ppm	Zn extractible ppm
Eutrustox (Low Humic Latosol)	0-53	5,8	288	15,8
	53-79	6,8	230	0,7
	79-112	7,0	221	1,2
	112-140	7,1	141	0,5

Classification Soil Toxonomy	Profondeur cm	pH	Zn total ppm	Zn extractible ppm
Tropohumult	0-20	4,5	122	5,1
(Humic Latosol)	20-60	4,5	127	1,8
	61-86	4,6	157	1,1
Gibbsihumox	0-20	5,0	69	1,6
(Aluminous ferrugineous latosol)	20-36	5,1	80	1,4
Tropohumult	0-20	4,6	142	3,6
(Humic ferrugineous latosol)	20-36	4,2	127	1,9
	36-43	4,3	96	1,5
	43-66	4,3	94	0,7
	66-107	4,5	99	0,8

dynamique des anions majeurs : azote, soufre, phosphore

1. INTRODUCTION

Toute tentative d'estimation du potentiel de fertilité des sols prend en compte, en premier lieu, les teneurs absolues des nutriments, surtout s'il s'agit des sols ferrallitiques trop souvent assez mal pourvus à ce point de vue. On a même réussi à établir un certain nombre de normes dont on verra plus loin une synthèse (chap. XII, p. 271 sq.).

Mais il ne faut pas oublier qu'il ne s'agit là que d'une donnée statistique appelée à évoluer. Déjà, au chapitre VII, consacré à l'origine des éléments utiles aux plantes, on a mis l'accent sur l'importance des apports autres que ceux des minéraux de la roche mère, c'est-à-dire en provenance de l'atmosphère (azote, soufre, chlore, principalement), et de la végétation surtout s'il s'agit d'une forêt ombrophile.

Mais ces nutriments, qu'ils préexistent dans le sol ou qu'ils y soient apportés d'une façon ou d'une autre, y compris par les engrais chimiques, n'y restent pas inertes. La microflore, la végétation — végétation naturelle ou cultures — s'en emparent et les restituent, un peu plus tard, sous une autre forme (sauf exportation par les récoltes bien sûr) ; en outre, des réactions ont lieu entre les constituants du sol, matières organiques, argiles, oxydes et hydroxydes de fer et d'alumine, dont le résultat final peut être une meilleure assimilabilité par les racines ou, au contraire, une insolubilisation. Naturellement, les facteurs météoriques interviennent, surtout pluie et température. Même sans prendre en compte l'érosion, la pluviosité du climat joue un rôle considérable dans les sols ferrallitiques en favorisant la lixiviation de tous les sels solubles. Enfin, l'activité de l'homme vient se superposer à tout cela.

Il paraît inutile de préciser que la totalité de ces phénomènes reste toujours incomplètement connue (si c'était le cas, l'agronomie serait une science exacte ; nous n'en sommes pas là). Et dans l'ensemble, malgré tout impressionnant, des connaissances acquises, ne seront cités ici que les mécanismes intéressant la fertilité, en espérant qu'il ne s'y glissera aucune erreur et omission majeures.

Etant donné l'ampleur et la variété de cette matière, il a paru bon de séparer les anions majeurs, azote, soufre, phosphore, des principaux cations, potassium, calcium, magnésium — auxquels on ajoutera l'aluminium échangeable — et des oligo-éléments les plus importants en sols ferrallitiques, à savoir bore, cuivre, manganèse, molybdène et zinc.

2. DYNAMIQUE DE L'AZOTE ET ALIMENTATION AZOTÉE DES PLANTES

2.1. GENERALITES

On sait que la majeure partie de l'azote du sol est incluse dans les matières organiques présentes dans le sol ou à sa surface et qu'elle s'y trouve sous une forme inassimilable pour les plantes.

Bien qu'en zone ferrallitique forestière, il paraisse acquis que la dynamique d'une bonne partie de l'azote organique soit essentiellement liée à celle des acides fulviques (TURENNE, 1977), on continuera ici à envisager les facteurs de décomposition des matières organiques prises globalement et la fourniture d'azote au moyen des processus classiques :

- ammonification,
- nitritation,
- nitratation.

Il apparaît également nécessaire de préciser l'importance et les causes des pertes d'azote par le sol : volatilisation d'ammoniac, dénitrification, lixiviation des nitrates.

2.2. VITESSE ET TAUX DE MINERALISATION DES MATIERES ORGANIQUES

La décomposition des matières organiques des sols ferrallitiques se fait nettement plus rapidement qu'en sols tempérés du fait de l'ambiance chaude et humide des tropiques.

Equilibre sous végétation naturelle

Sous végétation naturelle, non perturbée par l'homme, la teneur du sol en humus, et donc en azote, est stable : les gains y compensent les pertes. Ceci n'exclut pas une minéralisation extrêmement active estimée annuellement par GREENLAND et NYE (1959) à 170 % de la quantité de litière mesurée à un instant donné dans une forêt sempervirente du Ghana. Evidemment, les dix tonnes de matière sèche végétale qui tombent par an et par hectare maintiennent constants les taux de carbone et d'azote, malgré cette minéralisation rapide (NYE et GREENLAND, op. cit.).

Lorsque la couverture végétale est moins dense, forêt sèche ou savane, il y a également équilibre, bien que les phénomènes décrits ci-dessus agissent avec moins d'intensité. Mais ils sont, dans la pratique, souvent perturbés par les feux.

Fortes pertes lors de la mise en culture

Au moment du défrichement, cet équilibre se trouve rompu à la suite de la suppression ou de la modification profonde de la couverture végétale ; on observe alors des pertes considérables de matière organique, et donc d'azote, dans la partie superficielle du sol (il s'agit surtout de l'humus et non de la litière souvent déjà détruite par la mise à feu des masses végétales) :

— 12 % pendant la première année de culture, après défrichement d'une vieille forêt de Yangambi (Zaïre) établie sur sol ferrallitique jaune fortement désaturé (BEIRNAERT, 1941).

— 10 % pour l'azote et 3 % pour le carbone, la première année,

— 6 % pour l'azote et 3 % pour le carbone la seconde année

en culture indigène après abattage et brûlis de la forêt au Ghana (NYE et GREENLAND, 1964). Il semble d'ailleurs dans ce cas que l'incinération incomplète ait laissé des résidus comptés ici avec l'humus.

— 25 à 30 % par an de la matière organique du sol pendant chacune des deux premières années de culture mécanisée après défrichement d'une forêt sèche en Casamance, dans le sud du Sénégal, forêt établie sur des sols ferrallitiques faiblement désaturés et sableux en surface (1) (FAUCK, 1955 ; FAUCK, MOUREAUX et THOMANN, 1969).

Cette libération considérable d'azote est évidemment très propice aux cultures mais représente un appauvrissement rapide du potentiel de fertilité du sol. Lorsque le temps de culture se prolonge, les pertes annuelles s'atténueraient considérablement : NYE (1959) affirme qu'elles ne dépassent pas 4 % du carbone (et aussi d'azote) total présent dans le sol et pourraient être simplement de 1 à 2 %, ainsi qu'il ressort de l'analyse d'essais agronomiques menés en Nigéria, au Ghana et à Trinidad (ces derniers chiffres se rapprochent sensiblement de ceux que l'on trouve en zone tempérée) ; STEPHENS (1969) confirme qu'elles furent de 3 % par an du taux initial de matière organique en 4 ans de culture en Ouganda.

On verra plus loin que les teneurs en azote et en carbone de certains sols ferrallitiques longuement cultivés tendent vers une certaine stabilité, grâce à des procédés culturaux adaptés et des restitutions organiques convenables [SIMPSON (1961) et STEPHENS (1969) en Ouganda ; RICHARD (1967) et LE BUANEC (1972) en Côte d'Ivoire, entre autres].

Les sols sous savane ou jachère herbacée semblent avoir, après remise en culture, un comportement assez voisin de celui des sols originellement sous forêt mais cultivés depuis un certain nombre d'années : ainsi, un sol ferrallitique moyennement désaturé de Bambari (R.C.A.), primitivement couvert d'Imperata cylindrica, perd annuellement entre 4,5 et 6,0 % de carbone total (et probablement aussi d'azote) pendant les trois premières années de culture (QUANTIN, 1965), chiffre voisin de celui trouvé pour les savanes du Ghana, soit 4 % (NYE et GREENLAND, 1960).

Quant aux quantités d'azote effectivement minéralisées sous culture, DJOKOTO et STEPHENS (1961) les estiment en moyenne à 54 kg/ha pour les divers sols du Ghana, chiffre qui n'a pas grande signification par lui-même, la fourchette pouvant passer de 33 kg/ha à 220 kg/ha suivant les types de sol et de végétation.

La nature de la couverture végétale et la minéralisation de l'azote

C'est un sujet apparemment peu étudié, mais qui, probablement, peut apporter des explications à des phénomènes mal élucidés.

C'est ainsi que les cultures pérennes (caféier, cacaoyer, hévéa, palmier à huile) dépérissent lorsqu'elles sont envahies par des « mauvaises herbes », Imperata ou Paspalum, mais prospèrent avec une couverture de recru forestier ou de légumineuses.

Une explication en fut donnée par FORESTIER (1964) ; cet agronome a constaté dans les caféieraies de la République Centrafricaine que la minéralisation de la matière organique du sol se faisait mal sous Paspalum, alors qu'elle était normale sous Pueraria javanica. Il s'agit là d'un cas très net, mais il est probable qu'il existe d'autres interférences encore peu connues entre végétation et qualité de l'humus.

---

(1) Les taux élevés de minéralisation de ces matières organiques ne sont pas l'apanage exclusif des sols ferrallitiques. En effet, on trouve une perte d'azote et de carbone de 20 à 30 % lors de la première culture dans des sols du Tchad bien différents puisqu'il s'agit d'argiles alluviales comportant souvent des nodules calcaires en profondeur (BOUTEYRE et LEPOUTRE, 1959).

La nature de la matière organique et l'intensité de la libération de l'azote

Dans ce qui précède, on a envisagé la matière organique du sol de façon globale. En fait, il faut avec DUCHAUFOUR (1965) séparer matières organiques fraîches ou à peine décomposées (débris de la couverture végétale forestière ou herbacée, résidus de récolte, végétaux enfouis dans le sol) de cette matière organique incorporée au sol et profondément transformée qui est l'humus. On conçoit facilement — et il est d'ailleurs prouvé — que les matières organiques fraîches se minéralisent très vite avec libération en quelques mois de leur azote, à l'exception d'une part relativement faible qui vient augmenter le stock d'humus du sol (MONNIER, 1965 ; FAUCK et CHARREAU, 1969).

Quant à l'humus proprement dit, son comportement varie très nettement suivant la nature de ses fractions : à titre d'exemple, on admet que 15 % seulement de l'humus a un « turn-over » relativement rapide ; il s'agit surtout de l'humine jeune, dite « microbienne » dont la durée du cycle de transformation pourrait être de l'ordre de 1 à 6 mois ; cette humine microbienne jeune s'oppose à la « vieille » humine de condensation, très stable, dont la demi-vie atteindrait 2 000 ans (1). Le problème se complique encore du fait que les différentes fractions n'ont pas toutes les mêmes teneurs en azote et qu'un rapport C/N supérieur à 25 bloque tout processus de minéralisation sans apport extérieur d'azote (1).

Il est aisé de se rendre compte que, lorsqu'on évalue globalement la matière organique d'un sol immédiatement après le défrichement, puis après un certain nombre d'années de culture, il y a au départ une intensité de minéralisation extrêmement importante du fait de la présence de débris organiques frais et de précurseurs de l'humus ; on assistera ensuite, avec le temps, à une diminution de la vitesse de minéralisation, et enfin, à une quasi-stabilisation du fait de la diminution progressive des fractions à évolution rapide et finalement de leur quasi-disparition, s'il n'y a pas à nouveau apport de matières fraîches (résidus de récolte, engrais vert, etc.).

Modèle mathématique de la minéralisation des matières organiques

On a proposé un certain nombre de modèles mathématiques, d'ailleurs assez voisins les uns des autres, pour rendre compte du schéma de décomposition et de synthèse du carbone et de l'azote organiques dans les sols (NYE et GREENLAND, 1959 ; BARTHOLOMEW et DON KIRKAM, 1960 ; LAUDELOUT, 1961 ; BARTHOLOMEW, 1972). On retiendra ici l'application qui en est faite pour les sols des tropiques humides par LAUDELOUT et VAN BLADEL (1967). Ces auteurs admettent que la décomposition de l'humus obéit à une cinétique du premier ordre et la synthèse à une cinétique d'ordre zéro et proposent l'équation :

$$d\,N/t = -KN + A$$

où N est la teneur en humus (ou en azote ou en carbone), t le temps, A la vitesse constante de synthèse et K la constante de vitesse de décomposition. L'intégration de cette équation donne :

$$\ln \frac{No - Noo}{N - Noo} = Kt$$

où No est la teneur en humus au temps to (habituellement bien connue) et Noo la teneur à l'équilibre, assez mal précisée en général.

Des données expérimentales obtenues en Amérique du Nord, en Afrique et en Asie montrent que la vérification est souvent excellente. Le paramètre K dépend évidemment du climat. On peut l'exprimer de façon parlante en considérant l'expression In2 : K qui est égale à ce qu'on peut appeler la demi-vie de l'excès ou du défaut de matière organique par rapport à l'équilibre Noo, c'est-à-dire le temps nécessaire pour réduire la différence

(1) Conférences prononcées à la séance du 11 Mars 1980 de l'Association Française pour l'Etude du sol par MM. JACQUIN, LEFEVRE et REMY.

Noo — No de moitié. Or, cette demi-vie est de 2 ans en sols sableux de Yangambi (Zaïre), 3 ans pour une jachère herbacée de Puerto-Rico, 7 ans pour un sol sous théier ombragé en Assam (Inde), durées qu'il est intéressant de comparer aux onze années trouvées sous maïs en culture continue dans l'Ohio et aux 25 ans des prairies de Rothamstead (Angleterre).

Bien que ce travail de LAUDELOUT et VAN BLADEL (op. cit.) concerne principalement la reconstitution de l'humus par la jachère, la réversibilité du modèle mathématique permet de l'appliquer également à la minéralisation après défrichement. En particulier, on peut en déduire qu'en deux ans, les sols ferrallitiques fortement désaturés sableux de Yangambi (Zaïre) perdent 50 % de leur stock d'azote et de carbone, chiffre très voisin de ce qui a été trouvé expérimentalement : soit 40 à 50 % en deux ans dans les sols ferrallitiques faiblement désaturés sableux (10 % d'argile en surface) de Casamance sous le climat à saisons fortement contrastées du sud du Sénégal, ou encore 40 % en 2 ans en sol ferrallitique (Haplustox) de Sierra Leone (BRAMS, 1971). La vérification expérimentale de ce modèle se révèle donc satisfaisante.

2.3. AMMONIFICATION DES SUBSTANCES ORGANIQUES DU SOL

Bien qu'on ait mis en évidence une certaine libération d'azote ammoniacal dans des sols desséchés soumis à une irradiation infra-rouge intense (DOMMERGUES, 1960), habituellement ce sont les germes ammonifiants, bactéries et champignons, qui sont les principaux responsables de cette transformation. Ces germes existent partout dans les sols, en particulier dans les sols ferrallitiques. Non seulement les matières organiques du sol sont ammonifiées normalement, mais des produits tels que l'urée ou la cyanamide ajoutés comme engrais sont transformés immédiatement.

Toutefois, il semble que l'ammonification soit nettement plus active dans les sols ferrallitiques couverts de forêt que dans les mêmes sols à usage agricole de Madagascar (DOMMERGUES, 1954). A noter que les basses températures auxquelles sont soumis les sols d'altitude gênent la minéralisation (BIRCH, 1959-b).

Humidité du sol

Si l'ammonification paraît être normale lorsque le sol est humide (capacité au champ), la dessiccation n'empêche pas ce processus de se poursuivre à un rythme ralenti jusqu'à des humidités extrêmement faibles, variables suivant les sols, mais pouvant aller jusqu'à pF 4,9 (DOMMERGUES, 1967), pF qui ne se rencontre qu'assez exceptionnellement dans la majeure partie des sols ferrallitiques, même en saison sèche. L'ammonification ne semble pas non plus inhibée par un excès d'eau (MOUREAUX, 1967).

A propos des seuils d'humidité compatibles avec une ammonification même ralentie, DOMMERGUES (1962) fait remarquer qu'ils peuvent varier suivant la forme de l'azote du sol (azote organique de l'humus, azote des débris végétaux, azote de l'urée). Les alternances dessiccation-humification donnent un coup de fouet à l'ammonification, phénomène qui s'accélère fortement lors de la réhumectation du sol (BIRCH, 1958 au Kenya ; MEYER, 1959 au Zaïre).

Température du sol

L'ammonification paraît peu sensible aux fortes températures : ainsi, MEYER (1959) a constaté que l'ammonification des sols de la cuvette centrale du Zaïre continuait normalement à 41-42°C, alors que la nitrification était arrêtée. Selon MOUREAUX (1967), l'optimum de température se situerait entre 40 et 45°C. Par contre, les basses températures des sols d'altitude semblent la ralentir assez sérieusement au Kenya (BIRCH, 1959-b).

Influence du pH du sol

Du fait que l'ammonification est réalisée par un grand nombre d'espèces de bactéries et de champignons (POCHON et BARJAC, 1956), elle serait assez peu sensible à l'acidité du sol. Toutefois, on s'accorde à penser qu'elle est ralentie, mais non complètement arrêtée, pour des pH du sol inférieurs à 5 et qu'elle s'accroît fortement lorsque le pH croît de 5 à 6.

On peut sans doute attribuer aux bas pH de certains sols du Congo, du Gabon ou de l'Amazonie, etc. (pH inférieurs à 4,5, souvent compris entre 3,5 et 4,5), l'accumulation de matières organiques grossières qui s'y produit par suite de la très lente décomposition des résidus végétaux en un milieu aussi acide.

Variations saisonnières

L'ammonification des matières organiques apparaît donc comme un phénomène relativement peu sensible aux conditions du milieu. Mais il serait faux de conclure à une fourniture régulière d'azote ammoniacal par le sol tout au long de l'année.

En saison sèche, l'ammonification, quoique ralentie, se poursuit, alors que la nitrification est arrêtée ou très réduite. Aussi assiste-t-on à une certaine accumulation de sels ammoniacaux dans le sol.

Lors des premières pluies, l'ammonification, favorisée par les alternances de dessiccation et d'humectation fréquentes à cette période de transition, est intense, alors que la nitrification se trouve encore ralentie par une humidité insuffisante ou des périodes de sécheresse. On constate d'ailleurs que c'est le seul moment où l'on recueille des quantités notables d'ammonium dans les eaux de drainage des sols ferrallitiques moyennement désaturés sur schistes de Côte d'Ivoire (ROOSE et GODEFROY, 1968).

Dès que la saison des pluies est bien établie, l'ammonification se poursuit régulièrement mais à un rythme plus calme que lors des premières pluies. En région équatoriale, humide toute l'année, ces rythmes saisonniers apparaissent atténués, mais on retrouve tout de même le maximum d'azote ammoniacal en avril en pays Bamiléké au Cameroun, c'est-à-dire au début des pluies qui suivent une saison sèche comportant toujours ici un certain nombre de précipitations (BENAC, 1969).

2.4. LA NITRIFICATION

On regroupe sous ce vocable les processus qui provoquent la transformation de l'azote ammoniacal en azote nitreux (nitritation) et celle de l'azote nitreux en azote nitrique (nitratation). Dans les sols bien drainés et suffisamment humides, la nitrification succède sans difficulté à l'ammonification.

Influence de l'humidité du sol

L'humidité optimale pour la nitrification serait quelque peu variable suivant les sols, mais toujours assez voisine de la capacité au champ (CALDER, 1957 ; MOUREAUX, 1959).

La dessiccation ralentit fortement la nitrification et, à partir d'un certain seuil, l'arrête totalement. Les opinions divergent assez sensiblement lorsqu'il s'agit de fixer ce seuil : SIMPSON (1961) pense que la nitrification cesse à 8 % d'humidité dans les sols ferrallitiques de l'Ouganda, ce qui est en contradiction avec une observation de GREENLAND (1958) pour qui la nitrification est encore importante à 4 % d'humidité dans un ochrosol du Ghana. ROBINSON (1957) situe la teneur critique en eau pour la nitrification aux cinq sixièmes du point de flétrissement (pF 4,2) dans les sols des hauts plateaux du Kenya.

Cette valeur rejoint à peu près celles trouvées par DOMMERGUES (1962) qui place le seuil de nitrification à pF 4,5-4,2 pour les sols du Sénégal (qui ne sont pas tous ferrallitiques, loin de là). Ainsi, selon ces deux derniers auteurs, les exigences hydriques minimales des bactéries de la nitrification sont assez semblables à celles des plantes supérieures pour qui le point de flétrissement est voisin de pF 4,2.

L'excès d'humidité, en diminuant les échanges gazeux (en particulier l'évacuation du gaz carbonique du sol vers l'atmosphère) et en créant des conditions d'anaérobiose, nuit grandement à l'activité des germes nitrificateurs et ceci dès que la teneur en eau du sol atteint 22-23 % (CALDER, 1957).

De toutes ces données, il ressort que la nitrification est beaucoup plus sensible que l'ammonification au degré d'humidité du sol. Par contre, les alternances de dessiccation et d'humidification dans les sols stimulent la nitrification au même titre que l'ammonification (BIRCH, 1958), bien qu'il soit difficile de faire la part entre stimulation proprement dite et prolifération bactérienne due à l'abondance dans le sol d'azote ammoniacal, ce dernier pouvant même, s'il est trop abondant, provoquer une inhibition de la nitrification (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970).

Influence de la température du sol

Les températures du sol supérieures à 40° arrêtent la nitrification (MEYER, 1959), alors qu'elles favorisent encore l'ammonification. La fraîcheur des régions d'altitude la ralentit (BIRCH, 1959). Les températures optimales se situeraient entre 28 et 36°, et peut-être un peu plus pour certaines souches bactériennes des régions tropicales (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970).

Influence du pH

Si, en zone tempérée, le pH considéré comme optimal pour la nitrification est voisin de la neutralité ou lui est légèrement supérieur (DOMMERGUES et MANGENOT, op. cit.), il est évident que cette transformation s'effectue en sols ferrallitiques à des pH nettement inférieurs.

Il ne faudrait pas en conclure à une indifférence des bactéries tropicales à la réaction du sol. D'observations effectuées en Côte d'Ivoire et au Cameroun on peut tirer la conclusion que la nitrification, faible ou inexistante à des pH inférieurs à 4,5, s'accroît progressivement lorsque le pH passe de 4,5 à 6 et qu'elle devient « normale » à pH 6 et au-dessus (JACQUEMIN et BERLIER, 1956 ; DUGAIN, 1959 ; etc.).

D'où l'influence favorable du chaulage sur la nitrification : après addition de 2 500 kg de chaux agricole à l'hectare, alors que le pH d'un sol ferrallitique jaune fortement désaturé de Yangambi passe de 4,9 à 5,7, l'azote minéral mesuré au champ croît de 10,6 ppm à 20,7 ppm en une semaine (MEYER, 1959).

Evolution saisonnière — le flux de nitrates

Il existe pendant la saison sèche une certaine accumulation de nitrates en surface dans les sols. D'après SIMPSON (1960) et STEPHENS (1962) en Ouganda et ROBINSON et GACOKA (1962) au Kenya, il s'agirait essentiellement d'une remontée capillaire due à l'évaporation. On peut sans doute penser également à une nitrification, même ralentie, qui se produirait dans les horizons encore humides.

Quoiqu'il en soit, cette accumulation est sans commune mesure avec l'*intense et rapide production de nitrates* qui explose littéralement lors des premières pluies (les anglo-saxons emploient pour la qualifier le mot évocateur de « flush ») (1).

Le phénomène débute brutalement dès que le sol se réhumecte (HAGENZIEKER (1957) au Tanganika ; GREENLAND (1958) au Ghana ; MOUREAUX (1959) à Madagascar ; MEYER (1959) au Zaïre ; MOORE et JAIYEBO (1969) au Nigéria ; BENAC (1969) au Cameroun, etc.), et s'étale sur un à deux mois en pays à saisons contrastées, un peu plus si les précipitations sont assez régulièrement réparties. Les quantités de nitrates produites sont importantes, en moyenne entre 30 et 90 kilogrammes de nitrates à l'hectare en Afrique orientale avec un maximum à 183 kg/ha et un minimum à 13 kg/ha (SEMB et ROBINSON, 1969), chiffres que l'on peut comparer aux 73 kg/ha de nitrates minéralisés annuellement sous culture de maïs et mil en sol ferrallitique sableux moyennement désaturé de Casamance dans le sud du Sénégal (BLONDEL, 1971-b). Ce qui compte surtout c'est la teneur en matière organique, le type de sol, qu'il soit ferrallitique ou non, intervenant très peu.

Après cette flambée d'activité, la quantité de nitrates présents dans le sol diminue sensiblement pendant la période pluvieuse, à tel point qu'on a voulu y voir une sorte d'inhibition totale de cette transformation, au moins dans les sols du sud du Sénégal et sous certaines cultures (BLONDEL, 1971-a). Dans les zones plus humides, il ne s'agirait que d'un simple ralentissement (DUGAIN, 1960 ; BENAC, 1969), peut-être plus apparent que réel, car pour ROOSE et GODEFROY (1968) l'activité des nitrificateurs reste excellente pendant toute la saison des pluies en basse Côte d'Ivoire, tout comme en Afrique orientale (SEMB et ROBINSON, 1969).

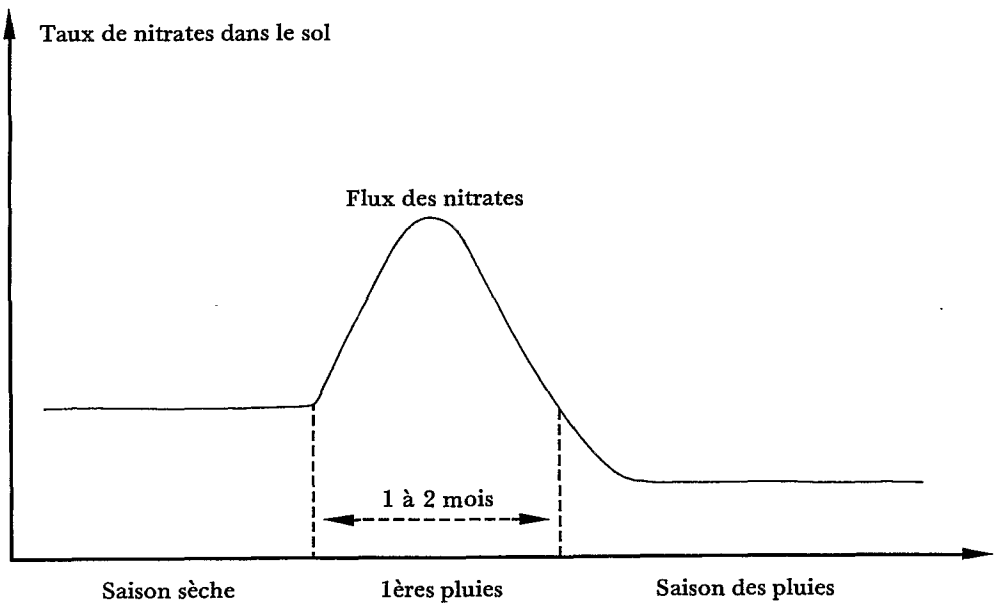


FIGURE 14

Variation du taux des nitrates du sol d'après BLONDEL *(1971)*

(1) Ce flux saisonnier de nitrates est loin d'être particulier aux sols ferrallitiques puisqu'on le retrouve avec une grande netteté en début de saison des pluies dans les sols de zone sèche aride africaine (Sénégal, Nigéria du Nord, Gezirah soudanaise) et au printemps en pays tempérés (Europe, Amérique du Nord). Les premiers auteurs qui l'ont signalé dans les sols ferrallitiques semblent être DIAMOND (1937) au Nigéria et GRIFFITH et MANNING (1949) en Ouganda.

Les explications données à cette subite diminution du taux de nitrates dans le sol sont de plusieurs sortes selon les auteurs ; on peut citer :

— la diminution de l'azote ammoniacal accumulé au cours de la saison sèche, les germes de la nitrification n'ayant plus à leur disposition que l'azote ammoniacal régulièrement produit ; d'autre part, les nitrates sont immédiatement consommés par les plantes alors en pleine croissance ;

— le lessivage des nitrates par les pluies abondantes (MOULINIER, 1954 ; GREENLAND, 1958 ; SEMB et ROBINSON, 1969) ;

— un excès d'humidité : la nitrification est sérieusement ralentie dans les sols de l'Ouganda lorsque la teneur en eau atteint 22-23 % (CALDER, 1957) et une dénitrification peut même se produire ;

— la fin de l'exaltation du pouvoir nitrificateur par les alternances dessiccation-humectation du sol, sans doute suivie d'une nitrification à « allure de croisière » pendant le reste de la saison des pluies, juste suffisante pour nourrir les plantes (aucune accumulation dans le sol).

2.5. PERTES D'AZOTE AMMONIACAL PAR LIXIVIATION OU VOLATILISATION

L'ion ammonium, bien retenu par les charges électro-négatives du sol, est peu mobile sous cette forme dans les sols ferrallitiques. C'est un fait qu'on ne le trouve en quantité notable dans les eaux de drainage que lorsqu'il est anormalement abondant dans le sol, c'est-à-dire pendant une courte période, — une quinzaine de jours au maximum en basse Côte d'Ivoire —, en tout début de saison des pluies (ROOSE et GODEFROY, 1968), alors que l'ammonification, très active, coïncide avec une nitrification encore ralentie par une humidité insuffisante du sol.

Par un mécanisme similaire, des pertes d'azote sous forme ammoniacale peuvent survenir dans les sols très acides (pH assez nettement inférieurs à 5,0 souvent 4,0 à 4,5) : l'ammonification, bien que ralentie, y existe encore, alors que la nitrification y est très faible, pratiquement nulle en fait.

En dehors de ces deux cas, il y a peu de pertes d'azote ammoniacal à partir du sol sous végétation naturelle ou sous culture dans les sols ferrallitiques (1). Les perspectives changent si l'on apporte sulfate d'ammoniaque et surtout urée. A vrai dire, les pertes sont surtout importantes en sols neutres et alcalins, cas assez rare chez les sols ferrallitiques — mais il faut noter que l'urée et l'ammoniaque liquide provoquent une augmentation momentanée du pH — ou lorsque ces engrais sont épandus à la surface du sol sans enfouissement (WATSON, CHIN et WONG, 1962 et COULTER, 1972, en Malaisie ; ACQUAYE et CUNNINGHAM, 1965 au Ghana). On a mis en évidence des pertes de 28 % d'azote avec l'urée sous hévéa en Malaisie après épandage superficiel.

Dès qu'on enfouit ces engrais, les pertes restent faibles ou nulles en sols acides pour les doses habituelles (BLONDEL, 1967-b).

2.6. PERTES D'AZOTE PAR DENITRIFICATION

La dénitrification n'intéresse par définition que les nitrates et nitrites. Elle peut se produire, soit par voie biologique, la plus importante, sous l'influence de micro-organismes

(1) Il n'est pas question ici des fermentations des matières végétales à la surface du sol qui évidemment produisent de fortes quantités d'ammoniac gazeux.

anaérobies spécialisés, soit par voie chimique par suite de l'instabilité des nitrites (rarement en quantités appréciables dans les sols ferrallitiques).

La dénitrification fut surtout étudiée dans les sols tempérés. En fait, c'est un processus qui ne se produit avec intensité que dans des conditions particulières : déficit en oxygène à la suite, par exemple, d'un excès d'eau, ou d'une réaction du sol franchement alcaline (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970) ; les plantes qui poussent sur ces sols peuvent accélérer quelque peu le phénomène, probablement par des excrétats de racines, mais dans une mesure faible et d'ailleurs assez mal précisée jusqu'à présent (DOMMERGUES et MANGENOT, op. cit. ; STEPHANSON et GREENLAND, 1970).

On peut penser, a priori, que les sols ferrallitiques, en général bien aérés et le plus souvent acides, souffriront peu de dénitrification. A vrai dire, il faut compter, même dans les sols bien drainés, avec des microsites où règne une certaine anaérobiose ; de ce fait, ces sols peuvent être le siège d'une certaine dénitrification, par exemple à proximité de débris organiques (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; GODEFROY, 1974):

Etudiant les sols cultivés du Ghana, GREENLAND (1956 et 1959) estime que la dénitrification y est toujours faible et que, lorsqu'elle existe, elle est le plus souvent masquée par des gains. Cet auteur affirme qu'on peut cependant la provoquer, lorsque le taux de nitrates du sol est élevé, en ajoutant du carbone facilement oxydable comme source d'énergie, ce qui rejoint les conclusions citées plus haut à propos des débris organiques. Il a trouvé toutefois que la dénitrification pouvait se produire normalement sous forêt avec une intensité élevée — environ 100 kilogrammes par hectare en six jours, d'après une expérience de laboratoire —. En fait, un tel sol étant à l'équilibre, pertes et gains s'annulent dans son environnement naturel.

2.7. ENTRAINEMENT D'AZOTE PAR LIXIVIATION DES NITRATES

Les nitrates, forme ultime des transformations des composés azotés du sol, sont très sensibles à la lixiviation par les eaux de drainage ; à tel point que l'on considère souvent que tout nitrate qui n'est pas immédiatement absorbé par les racines est perdu pour le sol.

Pourtant, ces pertes sont faibles à l'échelle du bassin versant lorsqu'il y a peu ou pas de cultures : 1,2 kilogramme d'azote à l'hectare (dont les trois quarts sous forme nitrique) à Yangambi au Zaïre (MEYER et DUPRIEZ, 1959), toujours moins de 10 kilogrammes à l'hectare au Ghana, qu'il s'agisse de forêt ou de savane (GREENLAND, 1959).

Toutefois, des études faites à l'aide de casiers drainants ont montré que le sol ferrallitique moyennement désaturé de Divo en Côte d'Ivoire, sol couvert de forêt semi-décidue, perdait annuellement, à partir des 150 centimètres supérieurs, environ 126 kilogrammes d'azote par hectare et par an dont les trois quarts à l'état de nitrates (ROOSE, 1970-a). Les études sur bassin versant paraissent donc dissimuler l'ampleur du phénomène de surface, celui qui intéresse au premier chef l'agriculteur.

Dès qu'il y a défrichement et cultures, la lixiviation des nitrates porte sur des quantités importantes : environ 170 kilogrammes d'azote par hectare et par an en sols ferrallitiques sablo-argileux faiblement désaturés sous arachide et mil au Sénégal méridional (FAUCK, 1956), de 90 à 200 kilogrammes annuels à l'hectare sous diverses cultures au Ghana et 30 kilogrammes/ha à Ibadan en Nigéria (1) (VINE et STEPHENS cités par GREENLAND, 1959). Evidemment, la lixiviation est surtout intense au moment du flux des nitrates ; elle diminue fortement ensuite (BLONDEL, 1971-a).

(1) La disparité des chiffres de pertes d'azote est vraisemblablement due à la durée des cultures après défrichement : défrichements récents dans le cas du Sénégal et du Ghana, probablement assez anciens à Ibadan.

Lorsqu'il y a apport d'engrais azotés à doses relativement importantes, les pertes peuvent être telles que la majeure partie de l'azote est perdue par drainage. Ce fait, déjà mis en évidence par LAUDELOUT (1950) au Zaïre, a reçu depuis de nombreuses confirmations, en Afrique francophone en particulier (ROOSE et GODEFROY, 1968 ; GODEFROY, MULLER, ROOSE, 1968).

Facteurs de la lixiviation des nitrates

Intensité de la pluie

La concentration des précipitations dans le temps et leur intensité favorise évidemment beaucoup l'entraînement de l'azote en profondeur. Diverses expérimentations, effectuées il est vrai dans les sols ferrugineux tropicaux sableux d'Afrique orientale et du Sénégal, ont montré que chaque millimètre de pluie fait progresser de 0,5 à 0,7 cm vers la profondeur le front des nitrates (KABAARA, 1964 ; BLONDEL, 1971-a), soit un mètre à un mètre cinquante pour deux cents millimètres de pluie. Confirmant cette observation, on peut citer un sol ferrallitique de l'État de São Paulo au Brésil, qui présente un mouvement *per descensum* des nitrates très voisin de celui du front maximum d'humectation du sol par la pluie (KINJO, KIEHL et PRATT, 1978).

Texture du sol et perméabilité

La lixiviation des nitrates apportés est nettement plus importante en sol sableux qu'en sol argileux (OLIVIN et OCHS,1974 ; NG SIEW KEE, 1977). Cette constatation, qui paraît relever du simple bon sens, est évidemment à porter à l'actif de la perméabilité du sol, mais dépend aussi, comme on le verra un peu plus loin, de la microporosité, elle-même fonction directe de la texture.

Teneur du sol en hydroxydes de fer et d'aluminium

Colloïdes électro-positifs, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, surtout s'ils sont sous forme amorphe, possèdent un certain nombre de charges positives susceptibles de fixer l'anion NO^-_3 ; il s'agit d'une propriété particulièrement intéressante dans les sols ferrallitiques souvent très riches en composés du fer et de l'aluminium (HINGSTON et *al.*, 1967 ; SING et KANEHIRO, 1967).

Malheureusement, cette adsorption n'est ni bien énergique, ni très spécifique. De ce fait, l'eau d'éluviation peut parfaitement désorber les nitrates déjà fixés ; cette eau abandonne ensuite un peu plus loin une partie de ses nitrates par fixations successives sur le sol, dès que sa concentration relative en N est plus forte que celle du sol. Il faudra un autre flot d'eau de drainage pour réaliser une nouvelle désorption et une autre fixation un peu plus en profondeur (SING et KANEHIRO, 1969 ; KINJO et PRATT, 1971).

D'où un entraînement des nitrates par « paliers successifs », ce qui se traduit en pratique par un « retard » du front des nitrates par rapport à la progression de l'eau d'éluviation (1).

Bien que l'adsorption des nitrates sur les oxydes et hydroxydes soit en général relativement faible — 0,7 milliéquivalent de nitrate pour 100 g de sol dans un sol ferrallitique (« Latossolo roxo ») de l'État de São Paulo au Brésil, pour une concentration de la solution de 150 ppm — elle n'en entraîne pas moins pour ce sol un décalage du front des nitrates qui se situe en retrait de 10 cm en moyenne par rapport à la zone d'humidité maximum, ceci pour une pénétration de l'eau de 70 centimètres (expérience sur colonnes de KINJO, KIEHL et PRATT, 1978).

(1) En sols tempérés, habituellement pauvres en Al et Fe, les nitrates ont presque tendance à précéder le front de l'eau, étant donné que les anions ne sont absolument pas retenus par les colloïdes argileux.

Nature des composés azotés (engrais et azote du sol)

La lixiviation des engrais azotés varie assez sensiblement suivant la nature de l'azote. Lorsqu'il s'agit d'engrais minéraux, la forme nitrate est la plus facilement lixiviée, tandis que l'azote du sulfate d'ammoniaque et surtout de l'urée l'est nettement moins rapidement (NG SIEW KEE, 1977), phénomène évidemment dû à la fixation momentanée de l'ion ammonium sur le sol avant sa transformation en nitrates.

De toute évidence, il faut faire une différence entre ces engrais (nitrates, sels d'ammonium, urée) et les nitrates déjà présents dans le sol, ces derniers issus de la minéralisation des matières organiques intimement mélangées au sol et de la décomposition des résidus végétaux ou des fumiers et composts incorporés à la terre par une façon culturale ; ces nitrates font partie intégrante des agrégats, ou sont adsorbés sur les colloïdes électropositifs, ou encore se trouvent partiellement dissous dans l'eau des pores de très petits diamètres. De ce fait, leur évacuation hors du sol arable ne peut se faire que lentement, soit par diffusion à travers le plasma, soit par entraînement par l'eau fort peu mobile de pores minuscules (WILD, 1972) (1). Cet azote « natif » se trouve donc à l'abri de la circulation rapide des eaux de pluies ou d'irrigation empruntant préférentiellement fissures et pores de grand diamètre. Tel n'est pas le cas des nitrates des engrais soumis de plein fouet aux courants d'eau circulant avec rapidité à l'intérieur du sol (JONES, 1976 ; WILD et BABIKER, 1976).

2.8. DISCUSSION : PEUT-ON DIMINUER LES PERTES EN NITRATES ?

On peut résumer sommairement les points traités dans ce paragraphe comme suit :

— la minéralisation de la matière organique s'effectue de façon intense dans les sols ferrallitiques dès qu'il y a défrichement et culture.

— la nitrification plus que l'ammonification est sensible aux conditions du milieu : humidité du sol, pH, température.

— la production de nitrates, très importante au début de la saison des pluies (pendant 1 à 2 mois) se ralentit sensiblement pendant le reste de la période pluvieuse. Ce phénomène est surtout net dans les sols soumis à des climats à saisons contrastées, beaucoup moins si la pluviométrie est bien répartie tout au long de l'année.

— les nitrates sont extrêmement sensibles à la lixiviation et sont facilement emportés hors de portée des racines par les eaux de drainage.

— si gains et pertes d'azote se compensent sous végétation naturelle âgée dans un sol qui est alors en état d'équilibre azoté, tout défrichement suivi de quelques années de culture provoque une diminution très rapide du stock organique du sol et, de ce fait, un appauvrissement considérable en azote (jusqu'à 50 % en deux ans de culture).

— les pertes d'azote par dénitrification et volatilisation d'ammoniac gazeux paraissent peu importantes en sols ferrallitiques.

Dès que l'on se préoccupe de la dynamique des nitrates dans une optique agricole, un grave problème saute immédiatement aux yeux : comment profiter au maximum de l'azote du sol et éventuellement de celui des engrais ? Donc comment diminuer les pertes, en particulier celles dues à la lixiviation des nitrates ? Or, tout l'azote apporté au sol ou y préexistant se transforme en nitrates ; et ces nitrates sont extrêmement sensibles à la lixiviation.

---

(1) On trouve peut-être là la justification d'une pratique agricole apparemment assez répandue en Chine. Il s'agit de l'incorporation au sol d'excréments humains et animaux par malaxage et pétrissage, de préférence manuels pour que le mélange soit plus intime (PEYREFITTE, 1973, « Quand la Chine s'éveillera », Fayard éditeur (Paris).

D'autre part, l'azote est l'élément qui, très généralement, manque le plus pour obtenir un rendement optimal. Tel se présente ce dilemme : apporter de l'azote au sol pour obtenir de meilleures récoltes, mais, en même temps, en voir une part, souvent importante, se perdre par lixiviation.

Palliatifs pour diminuer la lixiviation de l'azote

Jusqu'à présent, on ne peut proposer que des palliatifs pour diminuer la lixiviation des nitrates :

— *Emploi d'azote organique* : le plus efficace semble être l'emploi d'azote organique, résidus végétaux et fumier de ferme, bien incorporé au sol. Malheureusement, ce type d'amendement n'est pas d'usage courant sous les tropiques.

— *Emploi de sels d'ammonium ou de précurseurs de l'ammonium :* on utilise des préférence l'urée et le sulfate d'ammoniaque, et non pas des nitrates, afin de profiter du léger temps d'arrêt représenté par la fixation de l'ion ammonium NH_4^+ sur le complexe absorbant.

— *Les inhibiteurs de nitrification :* certaines substances comme la 2-chloro-6 (trichlorométhyl) pyridine (GORING, 1962 a et b ; TURNER et *al.*, 1962) ou encore l'azoture de potassium (PAPENDICK et *al.*, 1971), quand ils sont convenablement dosés, ont la propriété de ralentir la nitrification par une inhibition ménagée des germes nitrificateurs.

Jusqu'à présent, ces inhibiteurs ne semblent pas avoir fait l'objet d'un emploi systématique, ou plus simplement d'expérimentations longuement suivies, sauf peut-être en Extrême-Orient (WENG et HSU, 1969 à Formose ; REDDY et PRASAD, 1975 aux Indes). A cause du prix de revient ? Sans doute ! Mais aussi certainement en raison des difficultés d'emploi.

— *L'emploi d'engrais en granulés :* ce procédé fut préconisé vers 1950 dans les pays francophones d'Afrique afin de retarder (un peu) la lixiviation des nitrates et de faciliter la localisation de l'engrais ; tel quel, il paraît abandonné actuellement, mais semble retrouver une certaine faveur sous forme d'urée enrobée de soufre ou mise en présence de soufre (GODEFROY et MELIN, 1973 au Cameroun ; REDDY et PRASAD, 1975 aux Indes, etc.). Dans ce cas, le soufre agit ici dans le sens d'un retard à la nitrification de l'urée.

— *L'emploi du phosphate d'ammoniaque.* Les travaux de HINGSTON et *al.* (1967 et 1968) et de MEKARU et UEHARA (1972), en particulier, ont montré que l'adsorption « spécifique » de l'anion phosphate par les hydroxydes de fer d'un sol augmentait la capacité d'échange de cations de 0,8 milliéquivalent pour 100 g de sol pour chaque mole de P adsorbé. D'où l'idée de fournir de l'azote à deux latosols du São Paulo (Brésil) sous la forme de phosphate d'ammonium ; pour ces deux latosols, la quantité de NH_4 adsorbé par mole de phosphore augmente avec le pH et correspond à (KINJO, SILVEIRA, KADEKARU, 1978) :

0,7 me/100 g de NH_4 à pH 6,2
0,9 me/100 g de NH_4 à pH 7,0.

On retarde ainsi le lessivage de l'azote jusqu'à la formation des nitrates. Pour l'instant, il ne semble pas y avoir d'application pratique à l'échelle du champ cultivé.

Les procédés purement agronomiques pour diminuer la lixiviation de l'azote

Malgré tout ce qui vient d'être exposé, il faut bien reconnaître que le meilleur moyen d'éviter une perte d'azote par lixiviation est de faire consommer cet azote par les racines

des plantes. D'où un certain nombre de « moyens » dont l'agriculteur peut disposer à cet effet :

— éviter de laisser le sol nu, d'où des semis précoces des cultures dès le début des pluies ou, si ce n'est pas possible, d'un engrais vert qu'on enfouira ensuite (ne pas oublier que cette période correspond au « flux » des nitrates).

— utiliser au maximum le sol afin que les racines soient assez denses pour capter un maximum de nitrates. Une telle situation existe pour les cultures pérennes, surtout si on leur associe une plante de couverture. Elle est plus difficile à réaliser pour les cultures annuelles, car il y a toujours une période après le semis où le sol est incomplètement exploré par les racines.

— ne fournir des engrais azotés qu'au fur et à mesure des besoins des cultures. En pratique, cela revient à fractionner les apports et à les faire coïncider avec une demande maximale (par exemple le début de la floraison).

La simple énumération de tous ces « moyens » de freiner la lixiviation des nitrates montre, s'il en était besoin, qu'aucun n'est totalement efficace. On peut néanmoins arriver à gérer de manière rationnelle le stock d'azote du sol et celui des engrais.

3. DYNAMIQUE DU SOUFRE

3.1. GENERALITES

On a vu précédemment que le soufre se trouve dans le sol en majeure partie sous forme organique (les neuf dixièmes souvent, parfois plus sous végétation forestière), mais que les quantités minimes qui y existent sous forme de sulfates sont seules assimilables par les plantes.

Du fait de ses faibles teneurs dans le sol (en moyenne dix fois moins que l'azote), on a longtemps considéré le soufre comme un oligo-élément. Des déficiences ont bien été signalées depuis longtemps sur théier au Malawi (STOREY et LEACH, 1933), mais ce n'est guère que depuis le début des années cinquante que l'on a pris conscience en régions tropicales de l'importance de cet élément (GREENWOOD, 1951 et 1954 au Nigéria ; CHENERY, 1954 en Ouganda ; MC CLUNG et *al.*, 1959 au Brésil ; BRAUD, 1962 en R.C.A., etc.), à tel point que l'on est souvent amené à inclure systématiquement le soufre dans les formules d'engrais, au moins lorsque celles-ci n'en comportent pas en tant qu'anion associé (dans le sulfate d'ammoniaque ou le superphosphate simple par exemple).

Les déficiences en soufre présentent parfois des aspects quelque peu inhabituels : sur un même type de sol, on les trouve fréquemment sur défriche de savane, alors qu'elles sont rares si la forêt a précédé la culture. En outre, il arrive souvent qu'une carence aiguë lors de la première culture s'atténue progressivement les années suivantes, pour disparaître ensuite totalement (DABIN, 1970 ; BOUCHY, 1970).

Ceci pose évidemment deux problèmes, celui des liaisons de cet élément non seulement avec la matière organique qui en est la quasi-unique forme de réserve, mais également celui de la permanence dans le sol des ions sulfates, seule forme assimilable, donc celui des processus de fixation du soufre par les colloïdes et de ses possibilités de lixiviation.

3.2. LE SOUFRE ET LA MATIERE ORGANIQUE

Incorporation du soufre à la matière organique

Le soufre apporté au sol, même sous forme minérale (soufre fleur ou sulfure), est très rapidement transformé en sulfate par des micro-organismes spécifiques. Si l'on se réfère aux conditions optimales de l'oxydation du soufre définies par ATTOE et OLSON (1966), humidité à la capacité au champ, forte porosité pour l'air, température voisine de 25°, pH neutre, seule une acidité excessive pourrait freiner quelque peu l'oxydation du soufre dans les sols ferrallitiques ; de fait, elle est habituellement extrêmement rapide (quelques jours à peine).

Après cette oxydation, intervient une série de réactions complexes de biosynthèse qui intègrent les sulfates à la matière organique du sol. Les produits finaux peuvent varier suivant que ces processus sont dûs à des bactéries ou à des champignons, mais les principaux, ou du moins les plus connus, sont la cystéine et la méthionie (WHITEHEAD, 1964 ; FRENEY et STEVENSON, 1966).

Libération du soufre à partir de la matière organique

Lors de la minéralisation de la matière organique, cystéine et méthionine se transforment en sulfates par une cascade de réactions dont la complexité peut expliquer la lenteur (WHITEHEAD, 1964). On a effectivement montré en Afrique orientale (HESSE, 1957 ; BIRCH, 1959) que l'oxydation biologique du soufre organique était un processus nettement plus lent que celui de la libération de l'azote. En outre, la méthionine, si elle est assez abondante, est capable d'inhiber un certain temps la nitrification (1) (HESSE, op. cit.).

Ces deux faits expliquent sans doute quelques carences en soufre que l'on constate après défrichement de certains sols, surtout s'il s'agit de sols de savane, mais il paraît douteux qu'ils puissent rendre compte de tous les cas de carence. Au bout de quelques années de cultures, ces carences s'atténuent puis disparaissent. La cause de ce phénomène est mal connue : modification de la nature de la matière organique ? augmentation relative de la teneur en composés organiques soufrés dont l'abondance finit par compenser la lenteur de l'oxydation ? Cette deuxième hypothèse semble en contradiction avec les résultats d'un essai de culture continue de cotonniers (10 années) en sol ferrallitique moyennement désaturé de Bambari en R.C.A., où soufre et azote ont diminué parallèlement de 30 % par rapport aux teneurs initiales tout au long de l'expérience, alors que ce sol montrait initialement une carence nette en soufre qui a pratiquement disparu par la suite.

Quoi qu'il en soit, il semble bien que ce soit le soufre contenu dans la fraction la plus polymérisée de la matière organique (l'humine) qui joue le rôle de réserve et alimente la fraction soufrée liée aux acides fulviques, laquelle se minéralise avec rapidité.

Dans l'essai d'épuisement conduit sur dix ans cité plus haut, la diminution des réserves du sol en soufre reste compatible avec une alimentation soufrée de la plante parfaitement normale et régulière. Les conséquences de ce phénomène peuvent être très graves à long terme, car l'épuisement du sol en soufre risque de passer inaperçu et de conduire à une stérilisation irréversible (DABIN, 1970).

Un apport au sol paraît donc indispensable pour compenser les pertes (exportation, lixiviation), même si celles-ci n'ont pas à moyen terme des répercussions désastreuses. Une précaution élémentaire, en l'absence d'un contrôle des teneurs en soufre du sol par le

---

(1) Sans doute peut-on rapprocher ce fait des conclusions d'une expérience de GODEFROY et MELIN (1973) menée au Cameroun sur un autre type de sol (sol brun eutrophe formé sur lapillis volcanique) : ayant ajouté au sol une forte quantité de soufre-fleur, ils constatèrent que l'urée de la fumure minérale se trouvait bloquée au stade « ammonium », la nitrification paraissant inhibée.

laboratoire, est de fournir, en cas d'intensification des cultures, une formule d'engrais quaternaire NPKS (avec sulfate d'ammoniaque ou superphosphate simple), comme cela se pratique couramment en Afrique occidentale et centrale pour la culture cotonnière.

3.3. FIXATION DU SOUFRE DES SULFATES PAR LES COLLOIDES DU SOL

On a vu que si la matière organique constitue la principale réserve de soufre du sol, elle se décompose progressivement en libérant des sulfates, seule forme du soufre que les plantes soient susceptibles d'utiliser. Que deviennent ces sulfates dans le sol ?

MALAVOLTA (1967) reprenant pour les sols brésiliens les affirmations de BERGER et PRATT, considère qu'en moyenne, le soufre minéralisé par la matière organique et le soufre apporté par les engrais ont le destin suivant :

— 5 à 10 % sont utilisés immédiatement par les cultures (ou la végétation spontanée),

— 20 % sont adsorbés par les colloïdes du sol,

— 70 % sont entraînés en profondeur par les eaux de drainage.

On peut, bien sûr, discuter de la validité des pourcentages cités ici, mais il n'est pas niable qu'une partie plus ou moins importante des anions sulfates ainsi formés se fixe sur les colloïdes. GRANT et SHAXSON (1970) ont constaté, à l'appui de cette affirmation, que des applications de l'ordre de 100 à 400 kilogrammes de sulfate d'ammoniaque par hectare et par an sur théier au Malawi avaient provoqué une accumulation de 100 ppm de sulfates extractibles dans les 30 centimètres supérieurs du sol, accumulation qui persistait (en s'amenuisant) quelques années plus tard, malgré l'emploi exclusif ensuite d'urée comme engrais azoté.

Les principaux colloïdes minéraux du sol et la fixation du soufre

D'après WHITEHEAD (1964), l'anion SO_4^{--} pourrait se fixer sur le complexe absorbant des sols de deux manières :

— en neutralisant les charges positives des colloïdes électro-positifs, essentiellement les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, ceci surtout par substitution de SO_4^{--} à des ions OH^-,

— en se substituant à l'aluminium et à la silice dans le réseau de la kaolinite (les smectites fixent fort mal les sulfates).

On a même donné des chiffres d'adsorption maximales de SO_4^{--}, obtenus en laboratoire il est vrai (AYMORE, KARIM et QUIRK, 1967) :

— 1 à 1,86 mé de SO_4^{--} pour 100 g de kaolinite,

— 84,2 mé de SO_4^{--} pour 100 g de pseudo-boehmite colloïdale (γ, Al_2O_3, H_2O),

— 13,4 mé de SO_4^{--} pour 100 g d'hématite (α, Fe_2O_3) artificielle.

L'adsorption par la kaolinite — proportionnellement faible par rapport à celles des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium du sol — ne semble pas admise sans discussion par tous les auteurs : ainsi CHAO et *al.* (1964) paraissent faire une place importante aux revêtements ferrugineux et alumineux de la kaolinite dans les mécanismes de fixation imputés à cette argile ; quant à MEKARU et UEHARA (1972), ils font surtout mention des charges positives présentes dans le sol pour expliquer ce phénomène ; il est vrai que leur matériel d'étude, des sols des Hawaï, présentait un pH_{KCl} supérieur au pH_{H_2O}, ce qui implique une très grande richesse en composés d'aluminium et de fer. Quoi qu'il en soit, la fixation de l'anion sulfate suit assez étroitement les isothermes de Langmuir ou de Freundlich (AYMORE et *al.*, op. cit. ; CHAO et *al.*, op. cit.).

Principaux facteurs influant sur la fixation des sulfates sur les colloïdes minéraux

Composés alumineux et ferrugineux du sol

Tout d'abord, la présence de composés alumineux et ferrugineux dans le sol est certainement un facteur important de la fixation des sulfates, comme on l'a vu plus haut. S'il en est ainsi, il n'est pas étonnant que NEPTUNE, TABATABAI et HANWAY (1975) aient trouvé beaucoup plus de soufre non-organique dans les sols brésiliens de l'Etat de São Paulo — en majorité ferrallitiques — que dans les sols tempérés de l'Iowa aux Etats-Unis certainement beaucoup moins bien pourvus en fer et aluminium.

Importance de l'état de division de ces composés

Plus ils sont fins, plus il y a de sites possibles pour la fixation des sulfates ; évidemment l'état colloïdal vrai présente une nette supériorité sur l'état pseudo-cristallin et surtout cristallin.

Le pH

L'adsorption des sulfates dans le sol se produit surtout à bas, et même très bas pH, de telle sorte qu'elle serait négligeable à pH > 6,4 (WHITEHEAD, 1964) ; lors de l'application de 400 à 600 kg/ha de sulfate d'ammoniaque sur des latosols de Malaisie, la rétention de l'ion sulfate est quasi-totale à pH 4,8, alors qu'elle n'est que de 85 % à pH 5,2 (expérience en lysimètre de BOLTON, 1968). Lorsque le pH d'un sol s'abaisse de pH 6,5 à pH 2 en même temps qu'il est traité par un sel d'aluminium, la quantité d'ion sulfate fixé augmente très rapidement de pH 6,5 à pH 4,5, puis reste stable — ou pratiquement stable — jusqu'à pH 2 (figure 15).

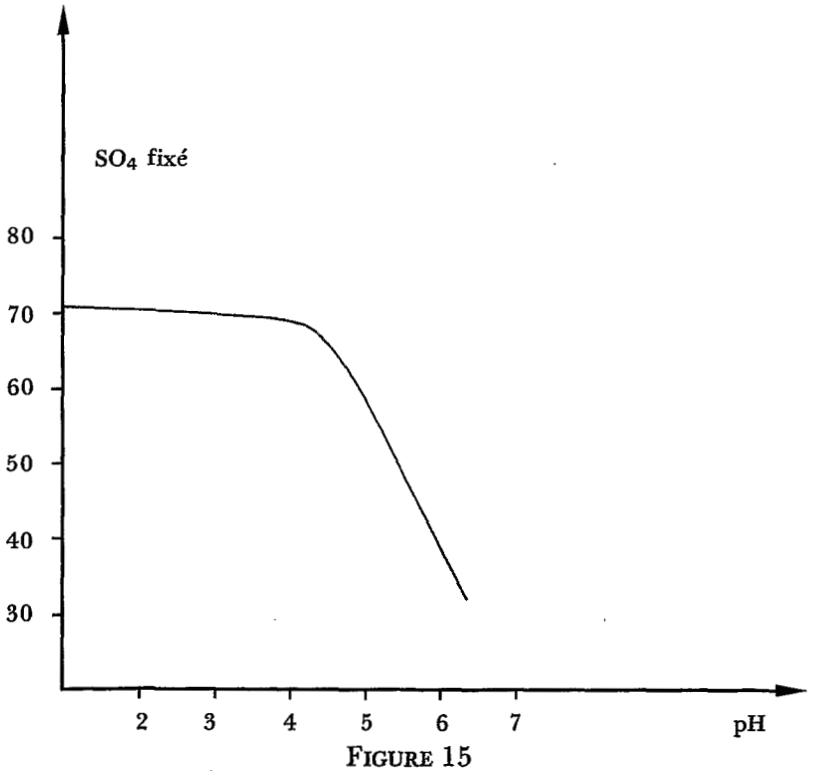


FIGURE 15

Fixation de sulfate sur un sol préalablement aluminisé en fonction du pH, in *SEGALEN (1973)*

L'aluminium échangeable

On peut, dans ce cas, penser que la présence d'*aluminium échangeable* favorise en plus la rétention de l'anion SO_4^{--} (SEGALEN, 1973), phénomène qui a toutes chances de survenir à grande échelle dans les nombreux sols ferrallitiques acides souvent si abondamment pourvus en aluminium échangeable.

L'action des anions PO_4^{---}, NO_3^{-}, Cl^{-}

Un certain nombre d'*anions, PO_4^{---}, Cl^{-}*, sont susceptibles d'entrer en compétition avec SO_4^{--} dans la neutralisation des charges positives : PO_4^{---} aura tendance à déplacer SO_4^{--}, mais ce dernier se substituera très facilement à Cl^{-} (WHITEHEAD, op. cit.). Par contre, il semble que la présence de l'*anion NO_3^{-}* favorisera la rétention de SO_4^{--} par une sorte de synergie NO_3-SO_4 (plus on fait absorber de nitrate à un sol des Hawaï, plus l'absorption des sulfates sera forte, selon MEKARU et UEHARA, 1972).

Libération des sulfates à partir des colloïdes du sol

La fixation de l'ion SO_4^{--} sur les colloïdes du sol relève de processus physiques. Il ne devrait donc pas y avoir de difficultés au passage inverse vers la solution du sol. Il faut tout de même faire une différence entre les sulfates fixés sur la kaolinite dont la désorption suit les isothermes de Langmuir, c'est-à-dire qu'elle est aussi facile et rapide que l'adsorption, et les sulfates fixés sur les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium qui font montre d'une certaine inertie lors de leur désorption ; en outre, une petite partie de ceux-ci ne se désorbera pas ou fort mal (AYMORE et *al.*, 1967).

Grâce à cette mobilité, les sufates présents dans le sol présentent toujours une grande disponibilité pour la plante. Etant donné leur capacité d'absorption de SO_4^{--} et une désorption relativement aisée (sinon rapide), les hydroxydes colloïdaux manifestent à ce point de vue une nette supériorité sur les oxydes et hydroxydes cristallins (moins bonne fixation, rétention assez forte) et surtout sur la kaolinite très mauvaise fixatrice (MEKARU et UEHARA, 1972).

Ceci explique peut-être, en partie, le fait qu'il y ait beaucoup plus de carences en soufre en sols de savane qu'en sols de forêt, l'ambiance climatique de cette dernière étant beaucoup plus favorable par son humidité permanente à la conservation de l'état colloïdal.

3.4. LIXIVIATION DES SULFATES DU SOL

Bien qu'ils ne forment assez souvent que le dixième du soufre total du sol et qu'ils puissent être partiellement retenus par les colloïdes du sol, les sulfates n'en sont pas moins soumis à une lixiviation importante.

On a remarqué sous forêt humide d'Afrique orientale (Tanzanie) que les teneurs en sulfates, très faibles dans la partie supérieure du sol (5 ppm dans la litière, 2 ppm de 0 à 5 cm, pratiquement nulles de 5 à 40 cm) augmentaient fortement dès 40-50 cm de profondeur : 154 ppm de 50 à 105 cm, 440 ppm de 135 à 165, au point d'y représenter les 9/10 du soufre total, alors qu'en surface les sulfates ne forment guère que deux centièmes environ du soufre organique ; ceci pour une teneur moyenne d'un peu moins de 400 ppm de soufre total sur l'ensemble du sol. Il y a donc, à partir de 40-50 centimètres de profondeur, une inversion de la proportion S organique/S des sulfates, les premiers dominant en surface, les seconds en profondeur (HESSE, 1957). Cette inversion souligne bien la sensibilité des sulfates à l'entraînement par les eaux de drainage, combiné avec une certaine rétention dans ses horizons profonds.

TABLEAU IX.1. — *Répartition des formes du soufre dans un sol sous forêt de Tanzanie d'après* HESSE *(1957)*

Profondeur cm	S (SO_4^{--}) ppm	S org. ppm	S total ppm
Feuilles fraîches surface	38	402	440
Litière au sol	5	330	335
0-5	2	388	390
5-20	0	371	371
20-40	0	357	357
40-105	154	112	266
135-165	440	64	504
165-180	450	34	484

Entraînement en profondeur, certainement ! mais il est possible que les ions sulfates soient plus sensibles que les cations alcalino-terreux ou alcalins au lessivage oblique : c'est du moins ce qui semble ressortir d'un essai fait sous culture de cotonniers à Bouaké en Côte d'Ivoire, où il y eut accumulation des sulfates dans l'horizon subsuperficiel (15-30 cm), principalement dans les parties basses de la parcelle, en tout cas beaucoup plus que dans les parties hautes (BOUCHY, 1970). Ce résultat n'est donné ici qu'à titre d'hypothèse, car il eût fallu vérifier que le drainage vertical s'opérait avec la même facilité partout sur l'ensemble de l'essai.

Une autre façon de souligner la facile lixiviation des sulfates est de considérer l'effet du soufre (ou des engrais en comportant) sur la réaction du sol. L'anion SO_4^{--} ne s'évacue pas seul, mais sous forme de sel, d'où un soutirage de cations, calcium et magnésium surtout, qui logiquement doit induire une baisse de pH. Effectivement, beaucoup d'auteurs ont insisté sur l'acidification provoquée dans le sol par des engrais soufrés, fleur de soufre en particulier, à tel point que l'on a même utilisé cette propriété pour abaisser le pH de certains sols trop alcalins du Ghana où le cacaoyer souffrait de ce fait de carences en zinc et manganèse (CUNNINGHAM, 1964). Si cette pratique, au demeurant onéreuse, se justifie dans les terres calcaires, elle restera l'exception dans les sols ferrallitiques plutôt affectés d'un excès d'acidité que par une alcalinité tout à fait exceptionnelle.

Il semble que l'on ait rarement essayé de mesurer les pertes en soufre par lixiviation : une expérimentation conduite en cases lysimétriques sur des latosols de Malaisie la chiffre à une vingtaine de kilogrammes pour un apport de 100 kg de soufre sous forme de sulfate d'ammonium principalement, cette lixiviation étant due à la percolation de 44 mm d'eau ; cette quantité de 20 kg est une moyenne pouvant varier assez fortement suivant la nature des autres engrais, chlorure, phosphate, etc. et le pouvoir de rétention du sol (BOLTON, 1968).

3.5. DISCUSSION : BESOIN EN SOUFRE DES PLANTES

Il apparaît que le soufre du sol est contenu en quasi-totalité sous forme organique. Au cours de la minéralisation de la matière organique, ce soufre est progressivement mis à la disposition de la plante sous forme de sulfates.

Si l'on sait que la lenteur relative de la minéralisation du soufre par rapport à celle de l'azote est à l'origine d'un certain nombre de cas de carence ou de déficience, on connaît mal quelles sont les formes de matières organiques (ou de composés soufrés organiques)

qui retardent ou au contraire accélèrent cette minéralisation. Car s'il est un fait maintenant prouvé, c'est que plusieurs années de cultures successives font le plus souvent disparaître ces carences et ces déficiences, et ceci bien que les réserves du sol en soufre diminuent constamment sans incidences apparentes sur la nutrition des plantes.

Cela amène à se poser la question des restitutions afin de satisfaire les besoins des cultures sans entamer trop fortement le stock présent dans le sol. BARTHOLOMEW et *al.* (1953) chiffrent à une vingtaine de kilogrammes par an et par hectare les exportations de soufre-élément d'une prairie de graminées dans la cuvette centrale du Zaïre, quantité qui doit probablement être augmentée de quelques kilogrammes pour compenser la lixiviation. Des chiffres nettement plus faibles, de l'ordre de 6 à 10 kg par hectare, furent cependant cités par d'autres auteurs.

Il faut tenir compte, il est vrai, de la grande plasticité des plantes pour cet élément : sauf pour quelques familles particulièrement avides de soufre comme les crucifères ou les malvacées, la consommation peut fortement varier suivant les disponibilités offertes par le sol, sans qu'il y ait de graves répercussions sur les rendements... tout au moins jusqu'à une certaine limite.

4. DYNAMIQUE DU PHOSPHORE

4.1. GENERALITES

Il est bien connu que dans beaucoup de sols ferrallitiques, le phosphore est l'un des éléments dont l'insuffisance se fait le plus nettement sentir. Bien souvent, les déficiences et carences en phosphore viennent en importance et en fréquence immédiatement après celles de l'azote ou à égalité avec elles. De plus, des sols à peu près convenablement pourvus au départ « s'épuisent » relativement vite en phosphore à la suite de cultures successives (NYE et GREENLAND, 1960 ; BOUCHY, 1970 ; GREENLAND, 1971 ; etc.).

C'est un fait bien connu qu'il existe une certaine originalité du comportement du phosphore par rapport à celui des autres éléments nutritifs présents dans le sol. Même en sol carencé en phosphore, il arrive que les engrais phosphatés, parfois, ne « marquent » pas, surtout s'ils sont mis à doses faibles ; lorsqu'ils ont un effet favorable, et c'est fort heureusement le cas le plus fréquent, cette action est limitée dans le temps, habituellement 2 à 3 ans (RICHARD, 1970 en R.C.A. ; LE BUANEC, 1973 en Côte d'Ivoire ; MASCARENHAS et *al.*, 1967, dans le Campo Cerrado Brésilien, etc.), exceptionnellement 5 ans (VELLY, CELTON, ROCHE, 1967 sur les hauts plateaux de Madagascar ; PICHOT et *al.*, 1973 en R.C.A.).

Comme on le verra plus loin, cette faible action résiduelle du phosphore n'est pas due à la lixiviation, à l'inverse de ce qui se passe pour l'azote ou le potassium, mais à une insolubilisation par le sol, phénomène déjà mentionné par LAUDELOUT (1954) au Zaïre.

4.2. FAIBLE LIXIVIATION DU PHOSPHORE

Tous les auteurs s'accordent à dire que, quels que soient les sols et le climat ou le type d'exploitation du sol (végétation naturelle, culture, jachère, sol nu), le phosphore du sol est très peu entraîné par les eaux de drainage et que les pertes sont minimes en l'absence

d'érosion notable (BOLTON, 1968). On a estimé sous forêt ces pertes à 4,841 kilogrammes de P_2O_5 (dont 1 kg sous forme insoluble et le reste sous forme soluble) par hectare et par an dans le sol ferrallitique moyennement désaturé de Divo en Côte d'Ivoire (ROOSE, 1970), avec un drainage annuel de l'ordre de 500 à 600 mm. En culture couvrant bien le sol, les pertes sont du même ordre : environ 4 kilogrammes par hectare et par an dans une bananeraie en sol ferrallitique jaune. On notera que la teneur en phosphore ne semble guère avoir d'importance sur cette perte, car le sol sous bananiers fut enrichi par des apports annuels moyens de 30 kg/Ha/an de P_2O_5 (exportation par des récoltes soustraites de ce total) pendant les 8 années de l'expérience. Les faibles quantités de phosphore perdues par le sol se répartissent à peu près également entre fraction soluble et fraction insoluble ; en effet, contrairement au cas précédent, le ruissellement est important dans cette bananeraie et atteint 6 à 10 % du volume des pluies (1600 mm) et de l'irrigation, tandis que le drainage annuel est estimé entre 450 et 680 mm suivant les années (GODEFROY, ROOSE et MULLER, 1975). Autre exemple : le phosphate monopotassique, donc très soluble, appliqué à la dose de 10 g de P_2O_5 par pied de cacaoyer n'a subi aucun lessivage en 67 jours, malgré 436 mm de pluie, dans les sols ferrallitiques jaunes fortement désaturés du sud-Cameroun (MASSAUX et *al.*, 1974).

On peut se rendre compte par ces exemples que la dynamique du phosphore est totalement différente de celle des autres éléments (N, K, Ca, Mg) entraînés ici par les eaux de drainage en quantités de l'ordre de centaines de kilogrammes par hectare et par an.

Cette lixiviation pratiquement nulle explique l'intérêt des agronomes pour les fumures phosphatées de fond. Malheureusement, le phosphore apporté ne subsiste par toujours sous une forme disponible pour les plantes, ainsi qu'il est exposé dans le paragraphe suivant.

4.3. LA RETENTION DU PHOSPHORE PAR LE SOL ET LE POUVOIR FIXATEUR DES SOLS FERRALLITIQUES

On a remarqué depuis longtemps que beaucoup de sols absorbaient à terme le phosphore apporté par les engrais avec une force telle que les plantes avaient beaucoup de mal à l'utiliser par la suite. Il est d'ailleurs constaté couramment que les fumures phosphatées ont peu d'effet résiduel. Le principe de la mesure de cette sorption est simple : on met en contact quelques grammes de sol avec une solution contenant un phosphate soluble ; au bout d'un certain temps, on mesure le phosphore restant en solution, les méthodes les plus employées étant celle de JURTZ, de TURK et BRAY (1946) et celle de DEMOLON et *al.* (1953) reprise par BLANCHET et *al.* (1963) et GACHON (1966) ou encore de FARDEAU et JAPPE (1980).

A noter que la sorption du phosphore par le sol ne suit pas exactement les isothermes d'adsorption de Langmuir ou de Freundlich. Si l'on veut utiliser ces dernières, on est amené à moduler les exposants en fonction de la teneur en aluminium échangeable, ceci en sols acides (FITTER et SUTTON, 1975).

Malgré tout, ce pouvoir fixateur apparaît en grande partie dû à des processus de sorption à la surface des hydroxydes de fer et d'aluminium, sorption d'autant plus intense que ces hydroxydes sont plus finement divisés (SMITH, 1965) ; on peut penser *a priori* qu'il sera élevé dans beaucoup de sols ferrallitiques, bien qu'inférieur à celui des sols à allophane où il n'y a pratiquement aucune cristallisation.

De fait, on a mesuré en sols ferrallitiques des capacités de sorption fort variables suivant les sols :

— 20 à 40 ppm de P dans les sols des cacaoyères du Nigéria méridional, sols en général relativement pauvres en hydroxydes (WESSEL, 1971).

— 30 à 370 ppm de P dans les sols ferrallitiques du Togo, du Dahomey et de la Guinée (BOUYER et DAMOUR, 1964),

— 30 à 800 ppm de P dans les sols sur granito-gneiss du centre de la Côte d'Ivoire (LE BUANEC, 1973),

— 375 à 1 100 ppm de P (avec une majorité de résultats entre 700 et 1 000 ppm) dans les oxisols et ultisols de Puerto-Rico (WEAWER, FOX, DROSDORF, 1975), chiffres dont l'ordre de grandeur est comparable à ceux trouvés par FOX et *al.* (1971) aux Hawaï et WEIR (1972) sur des sols bauxitiques de la Jamaïque.

Quoi qu'il en soit, la mesure en laboratoire du pouvoir de sorption ne permet pas toujours d'évaluer convenablement un niveau souhaitable de fumure phosphorique destiné à le saturer. Elle conduit même parfois à des incohérences économiques ; ainsi, la saturation du pouvoir fixateur d'un latosol des Hawaï nécessiterait 1 344 kilogrammes par hectare de phosphore-élément, soit 6 tonnes de superphosphate triple (YOUNGE et PLUCKNETT, 1966) ; dans d'autres sols, une vingtaine de tonnes de superphosphate (BOUYER, comm. pers.) seraient théoriquement nécessaires.

L'emploi de la valeur L de LARSEN, si elle est parfois d'un usage délicat (WONG YOU CHEONG et MC CONAGHY, 1972 ; TRUONG, PICHOT et BURDIN, 1973), a le mérite de pouvoir grossièrement séparer les sols qui nécessitent une fumure de redressement de ceux qui n'en ont pas un besoin absolu (LE BUANEC, 1973).

Etant donné l'importance quantitative des phénomènes de fixation et d'insolubilisation dans les sols à fort pouvoir fixateur, il n'est pas toujours souhaitable d'y effectuer des fumures de redressement et on peut préférer y mettre annuellement du phosphore sous forme soluble. Dans cette optique, FARDEAU et JAPPE (1980) proposent un indice permettant d'estimer dans les sols des tropiques le pouvoir fixateur et de choisir les formes d'engrais phosphoriques les plus adaptées.

Il semble bien d'ailleurs que le pouvoir de sorption ne soit pas tel que les plantes ne puissent pas s'approvisionner en phosphore, même si le sol est incomplètement saturé en P (SMITH, 1965). Cette hypothèse apparaît confirmée par une expérience d'ALMEIDA et BRASIL (1977) sur des sols ferrallitiques fortement désaturés du Campo Cerrado de l'Etat de Goias (Brésil) : alors que le pouvoir fixateur de ces sols atteint 500 à 700 ppm, une culture de Panicum donne son meilleur rendement pour un apport de 200 ppm de P seulement.

Enfin, pour certains auteurs, il paraît acquis que le phosphore fixé par le sol peut constituer une réserve potentielle, utilisable à terme par la plante au moins en partie (LE BUANEC, 1973).

4.4. LA RETROGRADATION DU PHOSPHORE

La mesure du pouvoir fixateur ne donne que des indications globales d'un intérêt pratique assez limité. Aussi, avec la meilleure connaissance des formes du phosphore du sol issue des travaux de CHANG et JACKSON (1957), fut-on amené à reformuler ce concept pour mieux en définir les processus. Ce sont ces processus que l'on groupe sous le nom de rétrogradation. La rétrogradation n'est pas l'apanage d'une catégorie particulière de sols, mais ses manifestations en sont particulièrement intenses et importantes en milieu ferrallitique.

Les formes du phosphore du sol et la rétrogradation

On a vu précédemment, chap. VIII, p. 115-120, que la méthode de CHANG et JACKSON (op. cit.) permettait de définir, malgré limitations et incertitudes, un certain nombre de formes du phosphore du sol et de les mesurer, à savoir :

— Phosphore soluble P-sol
— Phosphore lié au calcium P-Ca
— Phosphore lié à l'aluminium P-Al
— Phosphore lié au fer P-Fer
— Phosphore occlus lié au fer et/ou à l'aluminium
— Phosphore organique.

Seules les trois premières formes sont facilement accessibles aux plantes.

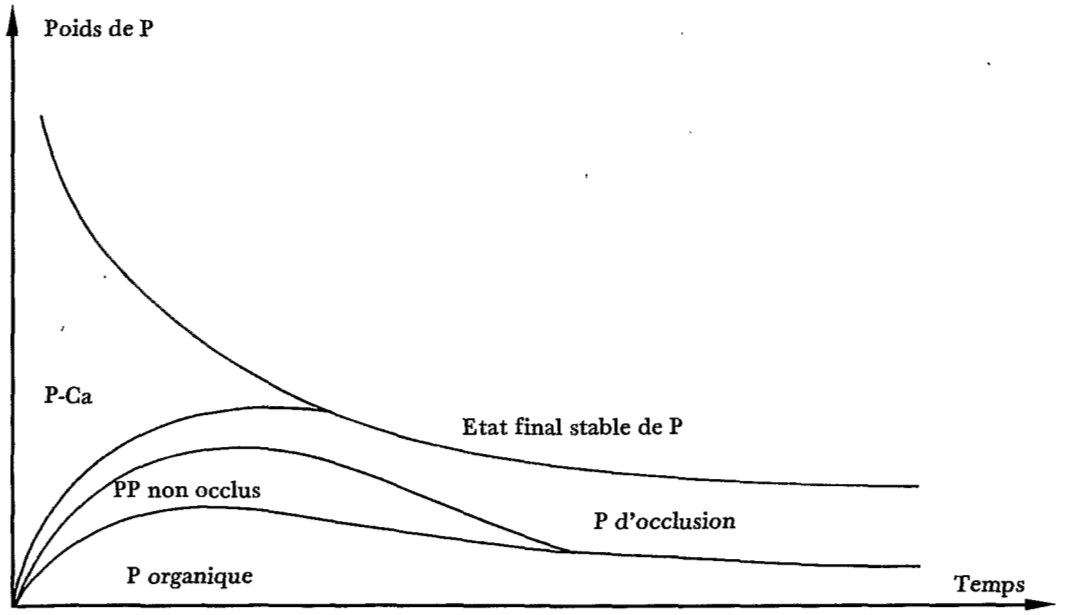


FIGURE 16

Formes du phosphore dans des sols d'âges différents développés sur la même roche-mère (chrono-séquences) d'après WALKER *et* SYERS, *cités par* DABIN *(1979)*

La répartition de ces formes dépend du degré d'évolution du sol, donc de son âge. Le graphique dû à WALKER et SYERS (Fig. 16) en donne une bonne idée, bien qu'il n'ait pas été établi pour les sols ferrallitiques. Comme ces derniers proviennent très généralement d'une pédogenèse fort longue (de l'ordre de la dizaine à la centaine de milliers d'années et au-delà), le phosphore qu'ils contiennent relèvera de l'état stable de WALKER et SYERS ; il y aura fort peu de phosphore lié au calcium, mais, par contre, une prédominance de phosphore lié à l'aluminium et au fer — surtout sous forme occluse — et de phosphore organique dont la quantité sera directement fonction de la teneur du sol en humus.

La rétrogradation du phosphore apporté aux sols cultivés

Si on ajoute au sol un engrais phosphaté, on assiste à une lente transformation des composés phosphoriques. Le phosphore soluble et le phosphore lié au calcium se transforment en phosphore lié à l'aluminium, puis en phosphore lié au fer et, enfin, en phosphore occlus (CHANG et CHU, 1961 ; DABIN, 1963), c'est-à-dire vers des formes de moins en moins solubles et assimilables.

Si la transformation en P-Al est rapide (on l'estime généralement qu'un an suffit), celle qui conduit à P-Fe est beaucoup plus lente (SHELTON et COLEMAN, 1968) : ainsi dans le sol ferrallitique moyennement désaturé de Bambari (R.C.A.), 50 % du P apporté est

rétrogradé en P-Fe en 5 ans et 90 à 100 % en 10 ans (DABIN, 1970-a) (1) (2). Lorsque le sol est pauvre en fer hautement réactif, mais riche en gibbsite, comme le sol de Sierra Leone étudié par BRAMS (1973), la transformation portera surtout sur P-Al, tandis qu'en Amazonie sur des sols acides désaturés, mieux pourvus en fer que celui de Sierra Leone cité précédemment, le phosphore des engrais se répartit entre P-Al et P-Fe (FASSBENDER, 1969).

En schématisant, il semble que le sol, après une fumure phosphatée, incorpore celle-ci et répartit le phosphore ainsi apporté entre les différentes formes selon les proportions qui existaient auparavant. Cette répartition se fait lentement, le phosphore occlus étant le dernier concerné.

Ce phénomène se vérifie bien dans le cas d'une fumure organique, fumier de ferme par exemple (DABIN, 1972 ; PICHOT et *al.*, 1973), mais il est parfois moins net s'il s'agit d'engrais minéraux seuls. Dans ce dernier cas, il faudrait, selon WESSEL (1971), faire la distinction entre les sols pas trop déficients en phosphore, où le schéma défini ci-dessus se révèle à peu près exact, et les sols très déficients où c'est la fraction P-Al qui bénéficie le plus de l'apport extérieur (il faut noter que les exemples donnés par WESSEL concernent des sols de cacaoyères du Nigéria de pH voisins de 6, ce qui explique partiellement ce fait).

4.5. NATURE DE LA LIAISON ENTRE ANION PHOSPHATE ET OXYDES-HYDROXYDES DE FER ET D'ALUMINIUM

Fixation physico-chimique

A la lumière des travaux de HINGSTON et *al.* (1967 et 1968), on a très vite pensé que la fixation des anions phosphoriques sur les oxydes et surtout les hydroxydes de fer et d'aluminium n'était pas seulement une simple adsorption physique de surface, mais entraînait des substitutions d'ions H_2O et OH par l'anion PO_4^{---} (HINGSTON et *al.*, 1972 ; RAJAN et *al.*, 1974 ; RYDEN, MC LAUGHLIN et SYERS, 1977-a et b). Les processus qui interviennent alors sont de plusieurs types :

1. Une simple sorption de surface qui suit exactement les isothermes de Langmuir.

2. Une adsorption « chimique » avec substitution d'ions H_2O de l'hydroxyde métallique par $H_2PO_4^-$,

$$\begin{matrix}\text{Fe-OH}_2\\ \text{Fe-OH}\end{matrix} + H_2PO_4^- \rightarrow \begin{matrix}\text{Fe-H}_2\text{PO}_4\\ \text{Fe-OH}\end{matrix} + H_2O$$

$$\text{Al} < \begin{matrix}H_2O\\ H_2O\end{matrix} + H_2PO_4^- \rightarrow \text{Al} < \begin{matrix}H_2PO_4\\ H_2O\end{matrix} + H_2O$$

3. Une adsorption « chimique » avec substitution d'ions OH par $H_2PO_4^-$

$$\begin{matrix}\text{Fe-OH}\\ \text{Fe-OH}\end{matrix} + H_2PO_4^- \rightarrow \begin{matrix}\text{Fe-OH}\\ \text{Fe-H}_2\text{PO}_4\end{matrix} + OH^-$$

$$\text{Al} < \begin{matrix}OH\\ OH\end{matrix} + H_2PO_4^- \rightarrow \text{Al} < \begin{matrix}OH\\ H_2PO_4\end{matrix} + OH^-$$

---

(1) Ce résultat est en gros vérifié par ROCHE et VELLY (1974) : à Madagascar, l'effet résiduel d'une fumure phosphatée de redressement atteint 9 ans, mais uniquement pour les doses les plus importantes, entre 400 et 600 kg/ha de P_2O_5.

(2) A défaut de pouvoir mesurer le temps nécessaire à une rétrogradation complète du phosphore apporté, des tests permettent d'apprécier l'intensité du phénomène ; ce sont surtout l'extraction à l'ébullition (SHELTON et COLEMAN, 1968) et l'extraction par la méthode Bondy après trois jours de contact sol-phosphate monopotassique (DABIN, 1970-a).

4. Une adsorption « chimique » avec cassure des ponts oxhydriles qui relient deux atomes d'aluminium, liaison du type Al-OH-Al, ce qui a pour résultat de créer de nouveaux sites de fixation.

Ces processus n'entrent en jeu à pH constant que successivement, l'un après l'autre (dans l'ordre indiqué ci-dessus), pour des doses croissantes de phosphate, le dernier — la cassure des ponts oxhydriles — n'intervenant que pour de très fortes concentrations en phosphore.

Lorsque le pH varie, la répartition des liaisons du métal avec H_2O et OH se modifie : H_2O tend à devenir prédominant pour les pH inférieurs au point iso-électrique et OH aux pH supérieurs à ce point. Ceci pourrait expliquer, au moins en partie, la très facile fixation du phosphore aux pH très acides, alors que cette fixation est plus lente aux pH qui tendent vers la neutralité (la fixation 3, substitution des OH^-, est plus difficile que la fixation 2, substitution de H_2O par PO_4.

Le degré de cristallisation des oxydes et hydroxydes intervient également : les fixations « chimiques » concerneraient surtout les substances amorphes, puis par « contamination » les substances cristallines pour autant qu'elles seraient en mélange avec une certaine proportion d'amorphes, ce qui est souvent le cas dans les sols ferrallitiques. Cette fixation — ou rétrogradation — du phosphore sur les composés du fer et de l'aluminium se présente donc comme un phénomène à quatre paliers successifs, le phosphore étant de plus en plus énergiquement retenu si l'on passe de l'un de ces paliers au suivant.

Fixation par combinaison chimique

Dans tout ce qui précède, il n'est question que d'adsorption du phosphore sans modification de la nature de l'adsorbant. Mais on ne peut exclure une fixation d'un autre type par réaction chimique classique : c'est ainsi que TAMINI, KANEHIRO et SHERMAN (1968), étudiant la fixation d'un phosphate mono-ammonique sur un « humic latosol » (1) des Hawaï riche en gibbsite cristallisée et en substances amorphes, ont montré qu'après une fixation rapide (quelques heures), due vraisemblablement aux processus exposés plus haut, il y avait transformation lente de la gibbsite en tarakanite-NH_4 parfaitement reconnaissable aux rayons X. Il s'agit ici d'un andosol, mais on ne voit aucune raison pour que ce phénomène ne se produise pas aussi en sols ferrallitiques.

Influence de la matière organique

Dans les sols, il faut, en plus, tenir compte de la matière organique qui agit comme un frein sur les fixations précédemment exposées. On a constaté que plus un sol s'appauvrissait en matière organique, plus il y avait rétrogradation énergique du phosphore des engrais, qu'il s'agisse des sols tempérés de France (FARDEAU, CHABOUIS et HETTIER, 1977) ou des sols rouges dégradés du Sénégal méridional qui sont ferrallitiques (DIATTA, FARDEAU, 1978).

« *A contrario* », la matière organique, lorsqu'elle est très abondante, peut favoriser une forte rétention du phosphore parce qu'elle « active » les hydroxydes (en particulier l'humidité constante qu'elle contribue à entretenir empêche leur déshydratation irréversible en oxydes plus ou moins cristallisés). A vrai dire, ce phénomène est surtout intense et fréquent dans les andosols et les sols hydromorphes, beaucoup moins en sols ferrallitiques.

(1) Sols actuellement classés comme Andepts dans la Soil Taxonomy.

Essai de synthèse sur les mécanismes de la fixation du phosphore

En résumé, il semble que l'on puisse à la lumière des faits exposés plus haut, aboutir à trois conclusions sur le mécanisme de la rétrogradation du phosphore apporté à un sol riche en oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium (1) :

— au début, il y a sorption rapide, de type physique, sur les matériaux ferrugineux et alumineux,

— au bout d'un certain temps (48 heures dans l'expérience relatée par RYDEN et *al.*, 1977), l'adsorption se ralentit beaucoup, ce qui correspond à la transformation lente d'une partie du phosphore « physiquement » adsorbé en une forme « chimiquement adsorbée », les premiers sites laissés libres permettant une fixation « physique » supplémentaire,

— puis, le phosphore « chimiquement adsorbé » paraît diffuser assez facilement, bien que lentement, à l'intérieur des oxydes et hydroxydes amorphes toujours « structurellement poreux » ; il le fait beaucoup plus malaisément s'il s'agit des formes cristallines généralement plus « compactes »,

— enfin, des combinaisons chimiques stables (tarakanite ?) peuvent se produire.

La rétrogradation, si l'on en croit les auteurs cités, correspond donc bien à une réalité : la pénétration progressive du phosphore à l'intérieur d'un matériau après une sorption superficielle.

Il est difficile d'être complet et de rendre compte de tous les travaux effectués sur un tel sujet, d'autant plus que les études sur la fixation du phosphore dans les sols apparaissent actuellement en pleine évolution. Il n'est donné ici qu'une synthèse brève des travaux en cours. On ne saurait trop conseiller au lecteur désireux d'approfondir cette question de se reporter à la bibliographie, sommaire, citée ici et de consulter les publications spécialisées.

4.6. LE ROLE DES SUBSTANCES ORGANIQUES DANS LA RETROGRADATION

On a reconnu depuis longtemps (STRUTERS et SIELING, 1950) qu'un certain nombre d'acides organiques : citrique, oxalique, tartrique, malonique, malique, lactique, etc. possédaient la propriété de former des complexes avec le fer et l'aluminium, empêchant ces derniers de se combiner avec le phosphore.

Or, ces acides existent en petite quantité dans la matière organique du sol. Celle-ci a de ce fait un rôle chélatant indiscutable et les substances citées précédemments le partagent vraisemblablement avec un certain nombre d'autres mal connues ; elle peut donc, dans une certaine mesure éviter l'insolubilisation du phosphore des engrais. Et c'est un fait qu'un apport de fumier facilite grandement la mise à la disposition de la plante des formes réputées inassimilables, y compris le phosphore occlus (PICHOT, TRUONG, BURDIN, 1973).

La nature de cette matière organique intervient fortement dans ces processus : bien humifiée sous forme de fumier de ferme, elle permet, en association avec une fumure minérale, la reconstitution de la fertilité phosphorique des sols ferrallitiques dégradés de Casamance (tout en atténuant le pouvoir fixateur du sol), alors que les traitements fumure minérale avec ou sans apport de paille conservent simplement le patrimoine phosphore sans l'augmenter comme on pourrait le supposer (DIATTA et FARDEAU, 1978).

---

(1) Le fer est le principal responsable de la rétrogradation. En effet, le phosphore lié à l'aluminium reste le plus souvent assimilable, sauf s'il se présente en inclusions (cas malheureusement assez fréquent).

En dehors de son rôle de réserve (phosphore organique libéré lors de la minéralisation de l'humus), la matière organique humifiée du sol ou celle pré-humifiée du fumier de ferme a donc un effet important dans la dynamique du phosphore, effet très favorable sur la mise à la disposition des plantes du phosphore du sol et des engrais minéraux (1).

4.7. REVERSIBILITE DE LA RETROGRADATION DU PHOSPHORE

La mise en évidence des phénomènes de rétrogradation avait fait craindre au début des années soixante que tout apport de phosphore inutilisé par les cultures ne se transforme avec le temps en composés insolubles de plus en plus inaccessibles aux racines et qu'à part une utilisation immédiate par une ou deux cultures, la fumure phosphorique ne tombe dans un puits sans fond, où le phosphore se trouverait insolubilisé, immobilisé, donc inaccessible.

On avait toutefois mis en évidence une variation saisonnière des diverses formes de phosphore à la Trinidad, en rizières il est vrai (AHMAD, 1967), ce qui pouvait laisser présager une mobilité du phosphore, et donc certains échanges entre les formes de phosphore présentes dans le sol.

Constatant que, dans les sols de R.C.A., les composés les plus stables du phosphore arrivaient à contribuer à l'alimentation des plantes, DABIN (1968 et 1971) a suggéré la possibilité, en milieu ferrallitique, d'une récupération des formes très stables du phosphore ou du moins considérées comme telles, si les conditions du milieu changeaient.

Réversibilité variable selon la forme de phosphore fixé

On a montré sur des sols de Nouvelle Zélande (contenant une certaine proportion de composés amorphes du fer), ainsi que sur un gel d'hydroxyde de fer, qu'il était relativement facile de désorber le phosphore fixé principalement par des processus physiques ; par contre, dès que le temps de contact entre la solution de phosphate et le sorbant dépasse une certaine valeur (ici 30 à 40 heures), la proportion de phosphore « chimiquement fixé » s'accroît fortement ; et ce phosphore est dix fois plus difficile à désorber que le précédent (RYDER et SYERS, 1977).

Il s'agit évidemment ici d'une expérience de laboratoire où les conditions sont rigoureusement constantes, en particulier le pH de sorption et de désorption. Elle a le mérite de mettre l'accent sur deux phénomènes qui, selon toute vraisemblance, existent dans les sols ferrallitiques :

— les substances amorphes, et en particulier les composés du fer, favorisent l'« irréversibilité » de la rétrogradation, puisque c'est à leur contact que le fer se fixe par des processus « chimiques »,

— plus le temps de contact s'accroît, plus une désorption ultérieure se révèle difficile et longue.

(1) On a montré sur les sols de loess de la région parisienne que la diminution de la teneur en humus à la suite de cultures successives conduisait à un affaiblissement progressif de l'efficacité des engrais minéraux, ici phosphoriques et potassiques (FARDEAU, CHABOUIS, HETIER, 1977). Cet exemple prouve, s'il en était besoin, la portée très générale de cette action de la matière organique.

Les facteurs d'une possible réversibilité de la rétrogradation

Un de ces facteurs est le pH : la correction de l'acidité par chaulage favorise le maintien ou l'apparition des formes liées au calcium et à l'aluminium, d'où une meilleure assimilabilité, et du phosphore du sol et de celui des engrais. VAN WAMBEKE (1971) rend compte d'observations faites en ce sens par divers auteurs brésiliens de 1961 à 1970. A l'inverse on a signalé après chaulage, une absence de réversibilité du phosphore rétrogradé de certains sols ferrallitiques des Antilles cultivés en bananiers (DABIN, 1964-a) ; toutefois, l'alimentation phosphatée de la culture paraît s'être nettement améliorée, ce qui laisse supposer que, si les processus analytiques n'ont pas détecté une meilleure assimilabilité du phosphore, les bananiers l'ont fort bien décelée et en ont profité.

On a montré aussi qu'un apport de matière organique induit une certaine mobilisation du phosphore du sol, le rendant ainsi plus assimilable : c'est le cas de l'engrais vert (RAO VENKATA et RAJAN GOVINDA, 1960 ; MOREL et QUANTIN, 1972). Quant au fumier de ferme, il aurait vraisemblablement une action plus profonde : ainsi, des sols ferrallitiques, moyennement désaturés et appauvris en éléments fins sur les 30 cm superficiels, du sud de la République Centrafricaine, ont vu leur teneur en phosphore occlus diminuer de moitié en 5 ans à la suite d'un apport annuel de 30 tonnes à l'hectare de cet amendement (PICHOT, TRUONG et BURDIN, 1973).

D'une façon générale, lorsque l'équilibre existant dans le sol est rompu par la modification d'un ou plusieurs facteurs, il se produit un réarrangement qui peut intéresser toutes les formes du phosphore (cela concerne tout autant la rétrogradation que sa libération).

Les prélèvements de phosphore soluble par les plantes brisent cet équilibre au détriment des formes les plus assimilables P-Ca et P-Al. On assiste alors à un transfert du phosphore occlus et du phosphore lié au fer vers ces formes plus directement assimilables. Etudiant un essai d'épuisement par culture continue de cotonniers à Bambari dans le centre de la République Centrafricaine (sol ferrallitique moyennement désaturé sur sérici-toschiste), DABIN (1971 et 1974) constate qu'en dix ans, toutes les formes du phosphore du sol ont diminué ; mais paradoxalement, c'est le phosphore lié au fer (y compris la forme occluse) qui a diminué le plus en valeur relative et absolue ; quant au phosphore organique, ses variations sont quasi-indépendantes de celles des autres formes du phosphore et suivent étroitement celles de la matière organique.

En définitive, il apparaît que toutes les formes du phosphore du sol peuvent concourir à l'alimentation des plantes, les formes liées au fer (P-Fe et P occlus) servant de réserve pour les formes les plus labiles (DABIN, 1974).

Intensité de la réversibilité de la rétrogradation

L'existence de la réversibilité de la rétrogradation amène à se poser deux questions essentielles : à partir de quel taux de phosphore du sol la libération du phosphore est-elle suffisante en quantité pour alimenter les cultures ? et encore, quelle doit être la vitesse de renouvellement des formes assimilables à partir des formes insolubles pour qu'il n'y ait pas déficience en phosphore chez les plantes cultivées ?

La réponse dépend évidemment de la cinétique du phosphore dans le sol, c'est-à-dire surtout des facteurs capacité et vitesse selon la définition de LARSEN, facteurs encore fort mal connus dans la plupart des sols et en particulier dans les sols ferrallitiques. Si, dans l'exemple cité plus haut, les rendements en coton-graines étaient encore acceptables après 10 ans de culture continue, l'expérience montre qu'il n'en est pas de même dans beaucoup de sols.

Un élément de solution se trouve peut-être dans l'étude du pouvoir de sorption du sol pour le phosphore ; en effet, selon RAJAN (1973), le flux de phosphore assimilable arrivant au contact des racines dans les oxisols des Hawaï préalablement fumés, est plus intense et plus continu dans les sols à fort pouvoir tampon pour le phosphore que dans les sols à faible pouvoir tampon, ce qui, entre parenthèses, semble démontrer que la réversibilité de

la rétrogradation est un phénomène parfaitement prouvé, mais aussi ne préjuge en rien de la quantité de phosphore mobilisé, même par un flux « intense ».

Mais c'est surtout dans l'étude des facteurs de LARSEN que les agronomes ont cherché la réponse à ce problème, ainsi qu'on le verra au paragraphe suivant.

4.8. LES FACTEURS DE LARSEN ET LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DES SOLS

Définition

Dans ce qui précède, il fut souligné à plusieurs reprises que la dynamique du phosphore dans les sols ferrallitiques se caractérise surtout, si on la compare à celle qui existe dans les autres types de sol, par une intensité différente des phénomènes étudiés plus que par leur originalité propre. Aussi, certains agronomes-chimistes ont-ils cherché à appliquer au milieu tropical les conceptions de LARSEN (1967) ; bien que celles-ci aient été précédemment exposées (chap. VIII., p. 122-123), il paraît utile, pour la commodité du lecteur, de les rappeler ici :

— *Facteur Quantité* : c'est la quantité de phosphore présent dans la phase solide du sol. On la détermine par la mesure du phosphore labile (valeurs L, E, etc.) ou toute autre méthode d'extraction convenable (le phosphore assimilable *sensu lato* entre dans cette catégorie, ainsi que le phosphore total).

— *Facteur Intensité* : c'est la quantité de phosphore présent dans la phase liquide, donc dans la solution du sol.

— *Facteur Capacité* : c'est la capacité du sol à maintenir stable la concentration en phosphore de la solution du sol, en dépit des prélèvements des racines. On le définit souvent par une capacité tampon potentielle (en anglais « Potential Buffering capacity »),

— *Facteur Vitesse* (le « rate factor » des auteurs anglophones) : c'est la vitesse de passage du phosphore de la phase solide à la phase liquide,

— *Facteur Diffusion* : ce facteur mesure la mobilité du phosphore de la phase liquide en fonction des gradients de concentration (il ne fut pratiquement jamais étudié de façon précise, sans doute faute de moyens analytiques appropriés.

Importance relative des facteurs de LARSEN

Une expérimentation due à ROCHE et *al.* (1978) portant sur de nombreux échantillons prélevés sur beaucoup de types de sols des régions intertropicales a permis de tirer les conclusions suivantes :

Le *facteur intensité*, mesuré par les méthodes d'ASLYNG (1954 et 1964), ne paraît pas présenter beaucoup d'intérêt pratique. Par contre, il existe de bonnes corrélations entre les résultats agronomiques d'une part et le *facteur capacité* (caractérisé par le pouvoir fixateur I_L de GACHON, 1966), le *facteur vitesse* (apprécié par la méthode DALLAL (1974) des résines échangeuses d'anions), et le *facteur quantité* (valeur L de LARSEN, P assimilable BRAY N° 2, P-Bondy et SAUNDER, P total) d'autre part.

En ce qui concerne les sols ferrallitiques, les méthodes qui présentent les meilleures corrélations avec l'alimentation phosphorique des plantes seraient par ordre décroissant d'intérêt (ROCHE et *al.*, 1978) :

— indice I_L de GACHON	facteur capacité,
— valeur L de LARSEN	facteur quantité,
— P assimilable BRAY N° 2	facteur quantité,
— P assimilable Bondy	facteur quantité.

Il est intéressant de rapprocher ces appréciations des conclusions de DALLAL et HALLSWORTH (1976) portant sur une vingtaine de sols d'Australie (seuls deux sols, classés comme lateritic-podzolic, sont ferrallitiques ou en sont très proches). Ces auteurs soulignent que les *facteurs Intensité et Vitesse* paraissent avoir peu d'intérêt dans l'état actuel de la méthodologie, sans doute parce que le premier présente une bonne corrélation uniquement avec l'alimentation phosphorique en début de végétation (jusqu'au 35e jour), tandis que c'est l'inverse pour le facteur vitesse (bonne corrélation seulement en fin de végétation, soit à 150 jours).

En définitive, la combinaison des facteurs capacité et quantité rend assez bien compte des variations de l'alimentation en phosphore de la plante et du volume des récoltes, ce qui rejoint les conclusions de ROCHE et *al.* (1978).

Malgré tout, en ce domaine, c'est encore le facteur quantité qui semble donner les meilleurs résultats et parmi les méthodes utilisées, celles qui font intervenir le phosphore labile (valeur L et E) paraissent les plus « fiables », mais pas les plus simples à mettre en œuvre. Aussi, dans la pratique courante, est-on obligé de se « rabattre » sur les processus d'analyse classique, comme le P-assimilable Olsen, le P-assimilable Bondy, le P-assimilable (en réalité semi-total) Saunder, qui apparaissent comme les mieux adaptées aux sols ferrallitiques.

Si l'on veut conclure, on peut dire que, jusqu'à présent, l'application des concepts de LARSEN n'a pas permis d'apporter des données révolutionnaires sur la dynamique du phosphore dans les sols tropicaux. On a pu, grâce à eux, préciser l'importance de certains facteurs comme le facteur capacité et à un moindre degré le facteur vitesse, mais c'est malgré tout le facteur quantité qui reste la façon la plus pratique d'apprécier la « fertilité phosphorique » du sol.

4.9. TOXICITE DU PHOSPHORE APPORTE AU SOL. QUE FAUT-IL EN PENSER (1) ?

On a remarqué que parfois l'application d'engrais phosphoriques au sol produisait des effets dépressifs sur les rendements et même l'état sanitaire des cultures, et ceci en dépit de teneurs du sol en phosphore en principe insuffisantes pour les cultures. Sans vouloir remonter trop loin dans le temps, il suffit de signaler les observations de ROSSITER (1951 et 1955) sur Trifolium subterraneum en Australie et WARREN et BENZIAN (1959) sur lupin en Angleterre, pour montrer que ce phénomène est assez général.

En ce qui concerne le domaine ferrallitique, STEPHENS (1966) note qu'en Ouganda, des applications annuelles de 180 kg de P_2O_5 à l'hectare sous forme de super-triple, faites pendant trois années consécutives, non seulement n'ont pas fait progresser les rendements de coton et maïs, comme on pouvait s'y attendre, mais les ont déprimés. BOUYER (1967) cite une interaction négative des engrais azotés et phosphatés sur arachide à Madagascar (alors que celle-ci est très généralement et normalement positive) et il attribue ce fait à la simultanéité d'une carence en potassium dans le sol. Autres explications données à une véritable toxicité du phosphate bi-ammonique sur céréales et pommes de terre dans le sud du Brésil : acidification du sol par un engrais générant uniquement des anions et intoxication des racines par une libération brutale d'ammoniac (COELHO et VERLENGIA), ce qui à première vue est contradictoire.

La véritable cause de ce phénomène étrange semble résider ailleurs. En effet, expérimentant en solution nutritive et sur des sols du Buganda (Ouganda), LE MARE (1977, a, b, c,) a montré qu'il existe une synergie Phosphore-Manganèse et qu'en conséquence, tout apport de phosphore sous forme soluble (ici du phosphate monocalcique) favorise l'absorp-

(1) Le lecteur désireux de compléter ces informations sur ce sujet pourra consulter BOYER (1980), cahiers ORSTOM, Sér. Pédol. (sous presse) : outre la documentation ici citée.

tion du manganèse par les racines ; cet apport peut, de ce fait, induire des toxicités manganiques (ici principalement sur coton), même dans ces sols bien fournis en calcium (8 à 10 mé/100 g de Ca) où le pH_{H_2O} est quelque peu supérieur à 6, mais où la teneur en manganèse total est très élevée. Le remède indiqué par cet auteur est de fournir au sol en même temps que le phosphore assez de calcium pour contrecarrer l'action du manganèse (antagonisme Ca-Mn, cf. chap. XI., p. 256) ; en pratique, un engrais phosphaté contenant un rapport molaire Ca/P_2O_5 égal ou supérieur à 1 se révèle adéquat (phosphate bicalcique ou tricalcique, superphosphate peu enrichi, scories de déphosphoration...).

Il semble donc en conclusion que chaque fois qu'une fumure incluant des formes concentrées d'engrais phosphatés (super-triple, phosphate bi-ammonique par exemple) donne en sol acide ($pH < 6$) des résultats nuls et surtout négatifs, il faille penser en premier lieu à une possible synergie P-Mn et remplacer ce phosphate par un autre nettement plus chargé en calcium.

4.10. LE PHOSPHORE ET LA CAPACITE D'ECHANGE DES SOLS A FORTE CHARGE D'HYDROXYDES DE FER COLLOIDAL

Beaucoup de sols ferrallitiques ont une part importante de leurs colloïdes sous forme d'hydroxydes métalliques de fer et d'aluminium. D'un point de vue électrostatique, ces colloïdes sont amphotères et ils ont leur point isoélectrique (le « zéro point of charge » des auteurs anglo-saxons) à pH alcalin — pH 8,5 pour la goethite — et sont donc normalement électro-positifs aux pH habituels des sols ferrallitiques. On conçoit que, par leur présence, ils peuvent bloquer un certain nombre de sites d'échange électro-négatifs des colloïdes argileux et humiques.

Lorsqu'ils sont mis en présence d'un anion, de préférence l'anion PO_4^{---} le plus actif, mais aussi SO_4^{--} ou Cl^- (peu actif), cet anion est retenu sur le colloïde électro-positif au moyen de deux phénomènes distincts (HINGSTON et *al.*, 1967 et 1968) :

— une adsorption non spécifique qui est une simple rétention à la suite de la neutralisation des charges de signe opposé dans la couche de Gouy,

— une adsorption spécifique qui affecte, elle, la composition de l'hydroxyde : l'anion « entre en coordinance » avec l'ion métallique, ce qui provoque le déplacement d'un autre anion, généralement des ions hydroxyles OH (cf. plus haut, p. 184).

L'adsorption spécifique du phosphore provoque un abaissement sensible du point isoélectrique des hydroxydes métalliques et, par voie de conséquence, augmente la capacité d'échange de bases de l'ensemble colloïdes argileux-colloïdes métalliques.

MEKARU et UEHARA (1972) ont réussi, par adjonction de 4,73 mé/100 g de phosphore, à faire passer de 10,95 à 15,34 mé/100 g la capacité d'échange (mesurée à pH 7) d'un sol ferrallitique des Hawaï. Evaluée sur un certain nombre de types de sols, l'augmentation de la capacité d'échange serait de 0,8 milliéquivalent par 100 g de sol par millimole de phosphate adsorbé. Cette opération pourrait présenter un intérêt, en particulier pour freiner la lixiviation des cations apportés par les engrais (K, NH_4) ; malheureusement, et les auteurs eux-mêmes le reconnaissent, les quantités de phosphates à mettre en œuvre enlèvent à cette opération toute portée pratique et surtout économique.

Dans ce domaine, KINJO, SILVEIRA et KADEKARU (1978) ont montré que, dans deux latosols de l'Etat de São Paulo, l'apport d'azote sous forme de phosphate d'ammonium permettait à pH 6,2 une rétention supplémentaire de 0,7 mé/100 g de NH_4 par mole de phosphore (0,9 mé/100 g de NH_4 à pH 7), ce qui diminue d'autant la lixiviation de cet azote, au moins jusqu'au moment de la transformation en nitrates.

Malgré la modicité du résultat obtenu, il y a là, très certainement, un domaine de recherche intéressant à fouiller pour les sols riches en fer et à très faible capacité d'échange.

4.11. RECAPITULATION

Elément fondamental des fumures minérales au même titre que l'azote et le potassium, élément souvent déficient dans les sols ferrallitiques (quand il ne s'agit pas, parfois, de leur carence principale), le phosphore présente une dynamique qui fut longtemps mystérieuse et que l'on peut caractériser ainsi très sommairement :

— une lixiviation pratiquement nulle aux teneurs habituelles dans les sols,

— un fort pouvoir d'insolubilisation par les oxydes et hydroxydes du sol qui joue de façon spectaculaire lors de l'apport d'engrais phosphatés au sol : c'est la rétrogradation du phosphore, surtout sous forme de composés du fer (les plus insolubles et les moins assimilables),

— une certaine faculté de remise sous forme soluble de ce phosphore rétrogradé sous l'influence du pH, de la matière organique... et même de prélèvements par les cultures. Il semble bien malheureusement que ce phénomène soit plus lent et moins intense que le premier.

Il en découle quelques conséquences importantes :

— les déficiences en phosphore ne sont pas toujours dues à des teneurs trop faibles en phosphore dans les sols riches en hydroxydes de fer, mais à un défaut d'assimilabilité de ce phosphore,

— l'arrière-effet des fumures phosphatées se limite à deux ou trois ans dans le cas général,

— les fumures de « fond » ou de « correction » n'ont pas toujours l'effet qu'on pourrait en attendre en raison de la rétrogradation, mais il est exagéré de croire qu'elles sont perdues. La lenteur de la rétrogradation et surtout sa réversibilité en permettent une certaine utilisation par les plantes.

dynamique des cations majeurs, potassium, calcium, magnésium, de l'aluminium et de certains oligo-éléments (bore, cuivre, manganèse, molybdène, zinc et chlore)

1. DYNAMIQUE DU POTASSIUM

1.1. INTRODUCTION

Il est relativement rare de trouver des sols ferrallitiques si abondamment pourvus en potassium que l'on puisse les cultiver de nombreuses années sans apport d'engrais qui en contiennent. Il est également rare d'observer des carences ou déficiences potassiques dès la mise en culture : l'une des plus célèbres de celles-ci en Afrique francophone est sans doute le cas des savanes de Dabou en Basse Côte d'Ivoire où les Elaeïs guineensis n'ont pu prospérer que grâce à des fumures potassiques (BOYE, 1962). Si l'on se place à l'échelle du globe, les superficies en cause, soit par leur extrême richesse, soit par leur pauvreté insigne, sont tout de même fort modestes.

Habituellement, on constate le schéma suivant : soit parce qu'il contient assez de potassium, soit parce qu'il s'est trouvé enrichi en cet élément par l'incinération de la végétation (Chap. VII.), le sol, immédiatement après défrichement, possède assez de potasse pour subvenir aux besoins des cultures. Puis un déficit apparaît au bout de quelques années (BRAUD, 1966 et 1971 pour l'Afrique francophone), dès la deuxième ou troisième année s'il s'agit de plantes sarclées [BOUCHY (1970) et LATHAM (1971) sur cotonnier en Côte d'Ivoire, VAN WAMBEKE (1970) au Zaïre], la quatrième année sur maïs dans le centre de la Côte d'Ivoire (CABANETTES et LE BUANEC, 1974), entre la huitième et la treizième année sur plantations pérennes de palmiers à huile avec plante de couverture au Nigéria (TINKER et SMILDE, 1963).

Il s'agit là bien évidemment de la fraction du potassium fixée sur le complexe absorbant, assimilable en priorité par les plantes, que l'on a l'habitude d'identifier au potassium échangeable, partie assez faible de l'ensemble du potassium contenu dans le sol.

Le potassium, en tant qu'élément majeur de la nutrition des plantes, se présente effectivement avec une dynamique particulière que l'on essayera de caractériser ici par :

— sa place dans le complexe absorbant du sol,
— la reconstitution spontanée de sa forme échangeable dans le sol,
— sa mobilité dans le sol et en particulier sa lixiviation.

Dans tout ce qui suivra, il sera surtout question des sols à kaolinite dominante, sans conteste la très grande majorité des sols ferrallitiques. Toutefois, certains auteurs ont classé comme ferrallitiques ou oxisols et ultisols (Gabon, Trinidad, etc.) des sols contenant de l'illite ou des smectites, autrement que comme traces (1). On s'efforcera donc d'indiquer, à l'occasion, dans quelle mesure ces types d'argile modifient la dynamique du potassium.

1.2. LE POTASSIUM ECHANGEABLE ET SA FIXATION SUR LE COMPLEXE ABSORBANT

La sélectivité des sites d'échange du complexe absorbant

On sait que le potassium échangeable représente une fraction variable du potassium total dans les sols, en moyenne 1 à 10 %, rarement plus de 10 %, sauf dans les sols où la fraction colloïdale est surtout représentée par des hydroxydes de fer et d'alumine.

Ce potassium échangeable semble occuper, contrairement à la théorie de GOUY, un certain nombre de sites préférentiels (BECKETT, 1964 et 1970 ; MENGER et HAEDER, 1973 ; ASSA, 1976, etc.), constatation faite principalement sur des sols tempérés généralement bien pourvus en minéraux argileux du type 2/1. En ce qui concerne les sols des régions tropicales, MOHINDER SING (1970) pense que, dans les sols à hévéas de Malaisie (sols ferrallitiques et sols alluviaux, tous très acides), le potassium est très fortement retenu sur 0 à 2,5 % des sites d'échange contre tout déplacement par les autres cations de la solution du sol et, de ce fait, est peu accessible aux racines des plantes ; par contre 30 à 50 % des sites peuvent être occupés indifféremment par l'aluminium, le magnésium et le potassium, qui sera ainsi facilement mobilisable ; enfin, les sites d'échange restant, environ 50 %, sont réservés préférentiellement à l'aluminium et aux autres cations pour des pH moins acides que ceux de ces terres à hévéas et ne peuvent être disponibles pour le potassium en aucun cas.

On a montré depuis un certain temps dans les sols tempérés d'abord (STRASMAN, QUIDET et BLANCHET, 1958 a et b ; MAC LEAN et SIMON, 1958 ; CHAMINADE, 1963 ; CRACHET, 1968...), puis en zone tropicale ferrallitiques (TINKER, 1959 ; OCHS, 1965 ; AHENKORAH, 1970) l'importance du rapport $\frac{K}{T} \cdot 100$: il y a carence potassique lorsque ce rapport est inférieur à 1,5 pour le palmier à huile au Nigéria (TINKER, op. cit.) et à 1,5 à 2 % (suivant le cas) pour le cacaoyer au Ghana (AHENKORAH, op. cit.). En outre, les études mettant en œuvre le rapport d'activité défini par BECKETT (1964) confirment pleinement ce point de vue (TINKER, 1964 ; ACQUAYE, 1973).

D'autre part, les expériences menées par OCHS (1965) sur palmeraie d'Elaeïs ont bien mis en évidence que le sol ferrallitique très désaturé de Dabou en Côte d'Ivoire ne pouvait retenir plus de 0,20 milliéquivalent de potassium pour 100 g de sol sans souffrir de lixiviation, ce qui correspond en gros à 4 à 6 % de la capacité d'échange.

(1) Il ne rentre pas dans le cadre ce cet exposé de prendre position sur l'opportunité de ranger parmi les ferrallitiques des sols ayant des proportions relativement importantes (en tout cas nettement supérieures à 2 à 5 % du total des argiles) d'illite ou de smectites.

Si l'on essaie de résumer ces observations sous une forme cohérente à partir du concept énoncé par MOHINDER SING (op. cit.), on peut conclure à titre d'hypothèse de travail que :

— le potassium échangeable est retenu sur un petit nombre de sites d'échange (1,5 à 2 %) avec une force telle qu'il ne passe que très difficilement dans la solution du sol et que les plantes ont beaucoup de mal à l'utiliser.

— sur un nombre mal déterminé de positions d'échange, mais probablement de l'ordre du double ou du triple des précédentes, le potassium est facilement disponible pour les racines, mais sa rétention est assez forte pour qu'il soit « protégé » contre un déplacement engendrant une lixiviation excessive.

— le potassium se fixe concurrentiellement avec les autres cations sur 30 à 50 % des sites d'échange, d'où une très bonne mobilité, mais associée à une probabilité de lixiviation intense.

— les sites d'échange restant (50 % environ) lui sont pratiquement inaccessibles dès qu'il y a compétition avec d'autres cations, ce qui est le cas normal dans un sol cultivé ou non.

Importance de l'environnement cationique et anionique sur la fixation et la mobilité du potassium échangeable

Quelques cations ont la propriété de gêner la fixation du potassium sur le complexe absorbant : il s'agit surtout des ions H, Al, NH_4 et dans une moindre mesure Fe. On a reconnu depuis longtemps que, dans les sols tempérés très désaturés, il était assez difficile de fixer du potassium sur le complexe absorbant (WICKLANDER et GIESECKING, 1948 ; LARSON, 1954 ; BARBIER, 1962) ; en milieu ferrallitique, on attribue habituellement ce phénomène à la présence d'aluminium échangeable, dont on sait qu'il impose au potassium une très vigoureuse compétition pour les sites d'échange (TINKER, 1964 au Nigéria ; FORSTER, 1971 en Ouganda). Ainsi, lorsque l'on met en contact un sol et des solutions contenant en proportions variables des ions potassium et aluminium, comme cela fut fait pour un sol à théier de Ceylan à réaction très acide, pH ($CaCl_2$ .0,1 M) = 3,7, on s'aperçoit que le sol, pris globalement, fixe toujours nettement plus d'aluminium que de potassium, la présence de matières organiques exagérant encore ce déséquilibre (SIVASUBRAMANIAN et TALIBUDEEN, 1972).

Quant à l'ammonium (1), on a reconnu qu'il exerçait une concurrence similaire pour les positions d'échange possibles pour le potassium (MERWIN et PEECH, 1950 ; STANFORD et PIERRE, 1946 ; WELCH et SCOTT, 1961 ; DUGAIN, 1959 ; FELIPE-MORALES et HANOTIAUX, 1971), mais d'une intensité plus faible que celle due à l'aluminium. En outre, l'ammonium se transforme assez rapidement en nitrate. Le fer semble avoir un rôle passif : des nuages d'hydroxyde, surtout s'ils sont sous forme réduite, « occultent » les sites d'échange empêchant la fixation des cations.

La difficulté de fixation du potassium en présence d'ions d'aluminium, et, dans une moindre mesure en présence d'autres ions, peut s'accompagner d'une bonne assimilabilité pour les cultures du potassium du sol, comme cela fut constaté sur les sols à théiers de Ceylan (SIVASUBRAMANIAN et TALIBUDEEN, 1971), mais surtout elle implique une grande facilité de lixiviation et du potassium déjà présent et de celui qui est apporté par les engrais (cf. p. 201 sq.).

(1) Il s'agit ici de l'ammonium échangeable et non de l'ammonium dit « natif » fixé à l'intérieur des réseaux minéraux (argile, oxydes, hydroxydes) ou faisant partie intégrante des molécules de matière organique. Les teneurs de cet ammonium natif sont, au contraire, en corrélation positive avec le potassium échangeable en milieu ferrallitique (OPUWARIBO et ODU, 1975).

Certains ions, au contraire, favorisent la fixation du potassium sur le complexe absorbant et aussi réduisent une mobilité excessive. C'est en particulier le cas du calcium. Effectivement, tout apport calcique non seulement diminue la solubilité du potassium du sol (et donc sa lixiviation), mais facilite considérablement la fixation de celui qui peut être amené par les engrais, comme on l'a noté dans les bananeraies de Guinée et de Côte d'Ivoire (CHAMPION et *al.*, 1958 ; GODEFROY, POIGNANT et MARCHAL, 1971) ou les champs de canne à sucre de Formose (SHIUE, 1971).

On attribue généralement cette action du calcium au déplacement de l'aluminium échangeable présent sur le complexe absorbant par l'ion Ca^{++}, lequel s'échange ensuite facilement avec le potassium (TINKER, 1964 au Nigéria ; BOLTON, 1968 en Malaisie ; GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL, 1976 en Côte d'Ivoire...) ; d'où la précaution de procéder au chaulage des sols très acides avant apport d'engrais potassique.

Le revers de la médaille est que tout apport trop brutal d'amendement calcique risque d'induire une carence en potasse (BLACK, 1968 ; ISLAM et BOLTON, 1970 ; ADAMS et PEARSON, 1967 ; GOEDERT et *al.*, 1975).

Les anions associés aux engrais ont également une influence sur la fixation du potassium dans le sol. Déjà, en 1943, de TURK et *al.* constataient que, dans le Corn Belt américain, le potassium des engrais est nettement mieux retenu par le sol s'il est apporté sous forme de phosphate ou métaphosphate que sous forme de chlorure. Tous les auteurs confirment que l'ion PO_4^{---} favorise grandement la rétention du potassium par le sol qu'il s'agisse des « humic latosols » des Hawaï (AYRES et HAGIBARA, 1953) ou des oxisols acides de la Trinidad (AHMAD et DAVIS, 1970). Les opinions divergent en ce qui concerne l'anion SO_4^{--} : d'une efficacité supérieure à celle du chlorure aux Hawaï, il lui est inférieur à la Trinidad. BOLTON (com. pers.) place les deux anions à égalité pour les sols à hévéa de Malaisie.

Quant au mécanisme de cette action, il paraît acquis que c'est grâce à la fixation de l'anion sur les colloïdes électro-positifs qu'elle se produit : cet anion neutralise alors les charges positives, laissant quelques-unes de ses valences (négatives) à la disposition du potassium, faisant ainsi une sorte de pont (de TURK et *al.*, 1943). On peut aussi penser avec MEKARU et UEHARA (1972) que l'anion en neutralisant les charges positives des hydroxydes (de fer surtout) abaisse le point isoélectrique de l'ensemble, donc favorise les sites électro-négatifs. Quoiqu'il en soit, tout se passe comme si l'anion engendrait sur le complexe absorbant des charges négatives supplémentaires disponibles pour le potassium.

C'est incontestablement l'ion PO_4^{---} qui est de beaucoup le plus actif en ce domaine ; SO_4^{--}, théoriquement, devrait avoir le même rôle, mais l'expérience montre que son action est bien moins intense. Quant à Cl^-, il n'est pratiquement pas retenu par les hydroxydes du sol.

1.3. LA RETROGRADATION DU POTASSIUM

En plus de sa fixation sur les sites d'échange, le potassium présent dans la solution du sol peut être soumis à un autre phénomène appelé rétrogradation (CHAMINADE, 1936).

Le potassium pénètre à l'intérieur des feuillets argileux grâce à la similitude des rayons ioniques du potassium déshydraté et des cavités hexagonales des minéraux 2/1 (PAGE et BAVER, 1940). Il s'y ajoute pour l'illite et la vermiculite une substitution dans les couches tétraédriques des réseaux (REITEMEIER, 1951 ; SCHUFFELEN et VAN DERMAREL, 1955 ; DUTHION, 1968) ; cette pénétration s'accompagne d'une contraction du réseau argileux dont l'épaisseur peut se réduire de 15,6 à 10,8 A° (BARBIER, 1962). Le phénomène inverse, c'est-à-dire une libération du potassium, a lieu lorsque le milieu s'appauvrit en potasse ; il se produit toutefois beaucoup plus lentement que la rétrogradation (WECKLANDER, 1954 ; BARBIER, op. cit.).

Un certain nombre de facteurs agissent sur la rétrogradation et la libération du potassium.

La nature des minéraux argileux

La rétrogradation est nulle pour les micas et les kaolinites, moyenne pour les montmorillonites, variable suivant les illites où elle est surtout importante chez les illites expansives, très forte pour les vermiculites (DUTHION, 1968).

Or, les minéraux argileux des sols ferrallitiques sont essentiellement constitués par des argiles de la famille de la kaolinite, associées à fort peu d'illite (quelques centièmes de la fraction argile cristallisée). Il existe évidemment quelques exceptions : oxisols de la Trinidad (AHMAD et DAVIS, 1970), certains sols sur schistes calcaires du Congo (BOISSEZON et GRAS, 1970), alfisols (classés comme ferrallitiques dans le système français) de la région cacaoyère d'Itabuna au Brésil (CONCEICÃO et *al.*, 1972), des sols à illite dominante (1) du Gabon (TERCINIER, com. pers.), etc... Jusqu'à plus ample informé, l'extension géographique de ces « exceptions » paraît faible.

La plupart des auteurs concluent, à la suite des travaux de LAUDELOUT (1950) au Zaïre, que la mise en réserve du potassium par rétrogradation est faible ou nulle dans les sols ferrallitiques, dans leur acception la plus commune.

La nature du cortège cationique

Un certain nombre de cations comme l'aluminium, l'ammonium, le césium possèdent la propriété de se fixer sur les colloïdes argileux et d'empêcher ultérieurement la pénétration du potassium. Le calcium, par contre, la favorise, sans doute parce qu'il neutralise l'aluminium du complexe absorbant (DUTHION, 1968).

De par leur richesse fréquente en aluminium échangeable, on peut prévoir que les sols ferrallitiques, même « exceptionnels », seront fort peu affectés par le phénomène de rétrogradation.

Les alternances de dessiccation et d'humectation

Une alternance de dessiccation et d'humectation a pour effet de modifier « *la répartition du potassium entre les espaces interfeuillets et les surfaces externes à équilibre, mais aussi elle paraît accélérer l'établissement de cet équilibre. En tout cas, des dessiccations, alternant ou non avec des réhumectations, peuvent aussi bien favoriser la fixation dans les sols récemment enrichis en K que sa libération dans les sols pauvres ou appauvris* » (BARBIER, 1962). C'est un phénomène connu également sous le nom d'effet ATTOE (1946 et 1948).

On a parfois constaté en sols ferrallitiques une certaine libération du potassium par alternance de dessiccations et humectations (par exemple JAIYEBO, 1968 au Nigéria ; SHIUE, 1971 à Formose), mais les quantités en jeu sont très inférieures à ce qu'on obtient en zone tempérée. Le plus souvent ce phénomène est sans effet pratique sur la mise à la disposition du potassium pour la plante.

En résumé

Il apparaît que la rétrogradation est de peu d'importance dans les sols ferrallitiques du fait de la présence de kaolinite comme argile dominante.

---

(1) Il ne rentre pas dans le cadre de cet exposé de discuter du bien-fondé du classement de ces types de sols parmi les ferrallitiques.

1.4. LA REGENERATION DU POTASSIUM ECHANGEABLE PAR LE SOL

Le pouvoir tampon du sol pour le potassium

On constate de façon très générale que lorsqu'un sol a été soumis à d'intenses prélèvements de potassium échangeable (exportations par les cultures, lixiviation), il tend à retrouver son niveau d'origine au bout d'un certain délai : DUTHION (1966) a montré qu'en France des parcelles de dactyle avaient exporté en trois ans 500 kg/ha de potassium sans que la forme échangeable de cet élément subisse une quelconque diminution, tandis que BECKETT (1970) parle en Angleterre d'une valeur d'équilibre $\frac{\text{K échang.}}{\text{CEC}}$ que le sol tend à reprendre, soit après fertilisation potassique, soit après une intense absorption par les plantes.

Cette « récupération » du K échangeable se produit également en milieu tropical au sens large — VELLY (1972) l'atteste pour les sols hydromorphes de rizières à Madagascar —, et les sols ferrallitiques ne font pas exception à la règle.

Il existe des cas où, pour ces derniers, elle compense immédiatement les prélèvements par les cultures : c'est ainsi que des sols du Mayumbe (Congo) supportent des bananiers, plantes très friandes en potasse, sans montrer le moindre déficit en potasse (AUBERT, 1958), qu'après plusieurs années de culture cotonnière il n'y a aucune diminution du potassium échangeable à Bouaké (Côte d'Ivoire) (RICHARD, 1967), que des alfisols (répertoriés comme ferrallitiques en classification française) du sud de l'État de Bahia au Brésil portent depuis près de cent ans des cacaoyers extrêmement productifs sans que se manifeste la nécessité d'une fumure potassique (FERREIRA, com. pers.).

Il ne s'agit malheureusement que d'exceptions sur la vaste superficie occupée par les sols ferrallitiques : normalement, le sol soumis à d'intenses prélèvements par des plantes cultivées voit sa teneur en potassium échangeable baisser jusqu'à un niveau auquel il reste stable malgré l'absorption de potassium par les cultures (HAYLOCK, 1956 ; ACQUAYE, 1973 ; HAINNAUX et *al.*, 1973). On a chiffré de 0,01 à 1,95 mé/100 g selon les sols la valeur de ce niveau stable pour les sols du Ghana (ACQUAYE, op. cit.). Il n'en reste pas moins que ce potassium stable se trouve très généralement en quantité insuffisante pour assurer des rendements convenables aux récoltes.

Quoi qu'il en soit, il est indiscutable — et de nombreux auteurs l'ont montré — que le sol peut fournir aux plantes, en plus du potassium échangeable, du potassium issu des réserves non échangeable : c'est ainsi que divers sols du sud-ouest du Nigéria ont assuré à des cultures de Pennisetum purpureum et de maïs de 0,06 à 0,43 mé/100 g de potassium issu des réserves non échangeables, soit à peu près autant que de potassium échangeable (SOBULO, 1973). Cet apport semble s'accroître quelque peu au fur et à mesure que la demande croît (HAINNAUX et *al.*, 1973).

L'origine du potassium échangeable de regénération

Il est donc amplement démontré que les plantes s'alimentent, au moins partiellement, aux dépens des réserves de potassium non-échangeable (ACQUAYE et *al.*, 1967 ; AUBERT, 1967 ; COULTER, 1972 ; FORSTER, 1972 ; MIDDELBURG, 1955 ; SALMON, 1971 ; SHIUE, 1971 ; WEIR, 1966 ; WILD, 1971, etc.).

Il paraît certain qu'une racine arrivant au contact d'un minéral est parfaitement capable de dissoudre certains éléments qui lui sont nécessaires (BARBIER, 1962) ; toutefois, cette hypothèse n'est que très partiellement retenue pour expliquer les prélèvements faits aux dépens des formes non-échangeables. On pense plutôt à une transformation dans le sol qui engendrerait du potassium échangeable à partir des réserves.

Le potassium rétrogradé

Dans tous les sols comportant une proportion importante d'argiles 2/1, le potassium rétrogradé forme une réserve assez facilement mobilisable en un temps relativement court. Cette hypothèse ne peut malheureusement être retenue pour la très grande majorité des sols ferrallitiques où — on l'a vu précédemment — la rétrogradation est pratiquement inexistante.

L'altération des minéraux primaires

En France, un granite concassé, pourtant très riche en quartz (42,6 %), mis en cases lysimétriques, a cédé à l'eau de drainage du potassium évalué à 32 kg de K_2O par hectare chaque année, soit environ 1 pour 10 000 de son potassium total, ces résultats étant acquis sur 30 ans (BARBIER, 1962).

On conçoit que dans les régions tropicales, où le climat est plus agressif, un tel phénomène puisse se manifester avec intensité.

De fait, les exemples cités plus haut de régénération rapide du potassium échangeable concernent surtout des sols riches en biotite (bananiers du Mayombe) ou comportant dans leur profil une importante quantité de micas divers en voie d'altération (cotonniers de Bouaké, cacaoyers de l'Etat de Bahia).

Malheureusement, au fur et à mesure que le sol évolue, s'approfondit et vieillit, les minéraux potassiques issus de la roche-mère deviennent de plus en plus rares, et les ressources en potassium obtenues par leur altération progressive finissent par devenir insignifiantes (MIDDELBURG, 1955).

Des phénomènes de rajeunissement peuvent survenir : ainsi, des saupoudrages par cendres volcaniques apportent aux vieux sols des minéraux dont l'altération libère chaque année une certaine quantité de potassium directement utilisable, par exemple en Indonésie (MIDDELBURG, op. cit.) et au Cameroun (SEGALEN, 1967). Bien que d'efficacité moindre, mais intéressant des superficies nettement supérieures, se situe ici le phénomène de remaniement des sols ferrallitiques : des transports sur courte distance amènent en surface des matériaux encore riches en micas plus ou moins altérés.

Libération du potassium à partir des minéraux secondaires

Tout ceci n'explique pas un certain pouvoir de régénération de sols ferrallitiques très évolués où on ne trouve plus comme minéraux primaires résiduels que du quartz, de l'ilménite, de la magnétite et du zircon. ROOSE et TALINEAU (1973), par exemple, ne s'expliquent pas l'origine des 1 200 à 1 400 kg/ha de potassium total que contiennent les premiers 40 centimètres du sol ferrallitique fortement désaturé sur sables tertiaires de basse Côte d'Ivoire : sol exclusivement composé de kaolinite, quartz, goethite et matière organique.

Il existe bien dans les sols, en particulier sous conditions tropicales humides, un « effondrement » des cristaux argileux (SEGALEN, 1968 ; SEGALEN et LEAL SILVA, 1969) ; il peut y avoir par ce moyen libération de potassium à condition que l'argile concernée en contienne dans son réseau, ce qui ne peut guère être le cas que de l'illite. Or, l'illite n'est présente dans ces sols qu'en si faible proportion (de l'ordre de 1 % de la fraction 0-2 microns) qu'on hésite à lui attribuer un grand rôle en ce domaine. A l'image du phosphore, ce potassium se trouve-t-il inclus dans les concrétions ferrugineuses ? D'après certains travaux récents, il ne le semble pas.

Le mécanisme de la régénération du potassium assimilable par les plantes

Le schéma de BECKETT (1970)

Cet auteur pense que l'on peut séparer le potassium utilisable par les plantes en trois grands groupes :

— le potassium échangeable extrait par l'acétate d'ammonium neutre et normal,

— le potassium intermédiaire dont la libération est très rapide dès la disparition de la forme échangeable, et que les plantes utilisent alors très facilement,

— le potassium à libération lente, dont la vitesse de libération constante ou quasi-constante est attestée par de très nombreux auteurs (HAYLOCK, 1956).

Une extraction par électrodyalise permet de mettre en évidence ces trois formes (figure 17). En partant de ce schéma, on peut imaginer aisément les deux modes de reconstitution du potassium échangeable :

— une reconstitution rapide qui se fait durant le temps d'une saison de culture à partir principalement du K intermédiaire,

— une reconstitution lente qui doit s'échelonner sur plusieurs années pour rétablir le niveau initial du potassium, à partir du potassium dit à libération lente.

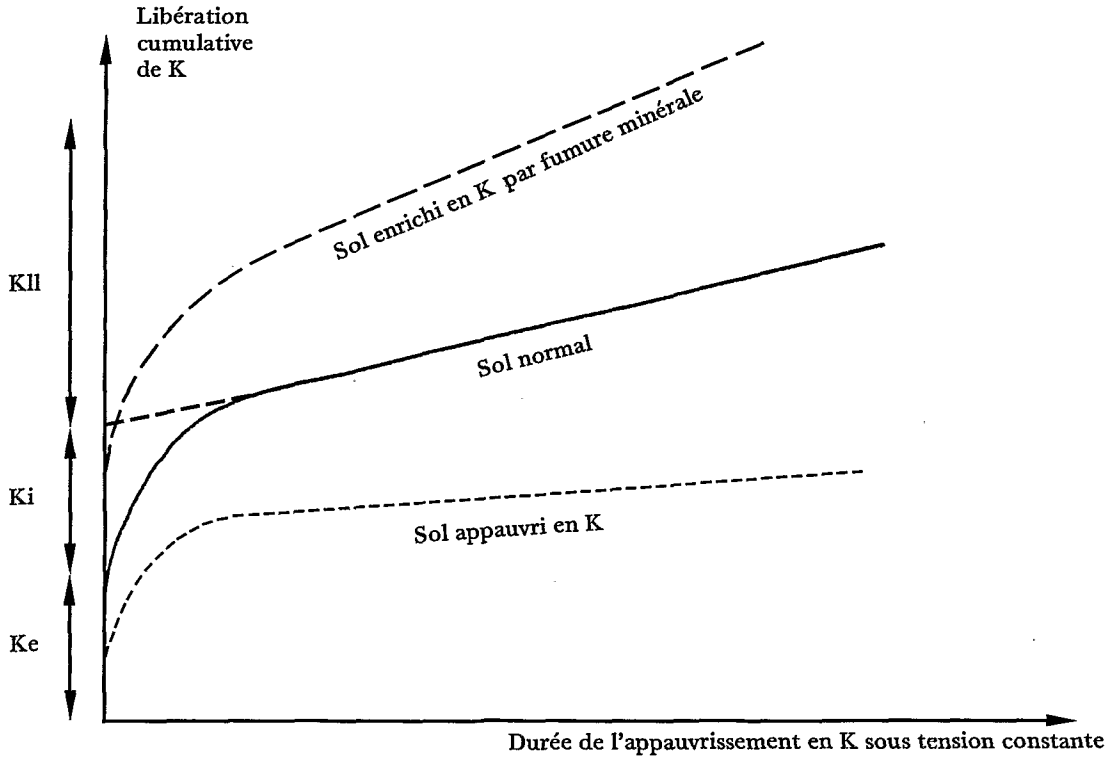


FIGURE 17

Libération du potassium dans des conditions d'appauvrissement constant et rigoureux d'après BECKETT (1964)

Ke potassium échangeable
Ki potassium intermédiaire
Kll potassium à libération lente

Après qu'un sol ait supporté un certain nombre de cultures épuisantes, on obtient une courbe semblable à celle du sol normal, mais plus basse et plus horizontale, ce qui semble indiquer que potassium intermédiaire et potassium échangeable diminuent proportionnellement moins vite que le potassium à libération lente ; à l'inverse, un apport d'engrais donne à la partie rectiligne de la courbe une pente plus accusée.

Dans le cas de prélèvements par les cultures égaux ou inférieurs à la quantité de potassium de libération lente apparu entre deux cycles culturaux, il n'y a aucune raison pour

qu'il y ait diminution du potassium échangeable dans le sol si d'autres causes n'interviennent pas (érosion, lixiviation...).

Application aux sols tropicaux

Il apparaît que le schéma précédent peut s'appliquer sans grande difficulté aux sols des régions intertropicales, avec une restriction toutefois : il est en effet peu probable que les engrais potassiques puissent augmenter sensiblement la pente de la partie rectiligne de la courbe citée par BECKETT (op. cit.), étant donné l'absence de rétrogradation qui caractérise les sols à kaolinite.

On a constaté dans le centre de la Côte d'Ivoire (région de Bouaké) que des sols ferrallitiques faiblement désaturés, au départ à peu près convenablement fournis en potassium échangeable (0,28 à 0,15 mé/100 g de la surface à 45 cm de profondeur), libéraient par ce moyen, sous cultures fourragères intensives, de 200 à 400 kg de potassium échangeable par hectare en trois ans, le dernier chiffre correspondant à environ 5 % des réserves potassiques (estimées par attaque aux trois acides) ; toutefois ce mécanisme, très lent, est incapable d'assurer un approvisionnement suffisant au maintien d'un bon niveau de production (HAINNAUX et *al.*, 1973).

Aussi, en l'absence de fumure potassique, est-il nécessaire que le sol soit « au repos » sous jachère pour obtenir une régénération suffisante du potassium échangeable. Plusieurs auteurs ont en effet montré qu'il suffisait de remettre en jachère pendant 2 à 4 ans les sols « épuisés » en potassium, ou encore d'entrecouper les cultures par de courtes mais fréquentes jachères, pour que les plantes puissent s'alimenter normalement en potassium (BRAUD, 1966 en R.C.A. ; LATHAM, 1971, en Côte d'Ivoire ; STEPHENS, 1969 en Ouganda, etc.).

Une certaine durée de jachère — ou sa fréquence dans la rotation — semble en effet nécessaire pour que se produise une reconstitution suffisante du potassium utilisable par les plantes à partir du potassium à libération lente, à condition toutefois que les végétaux (ou leurs cendres dans le cas des savanes brûlées tous les ans) restent sur le sol. Car la régénération se fait mal dans le cas des prairies paturées (ANDERSON, 1965). La formation végétale que constitue la jachère ne paraît guère avoir d'importance à court terme : JAIYEBO et MOORE (1954) trouvent à Ibadan la même augmentation de potassium échangeable dans les sols après 6 années de jachère, qu'il s'agisse de recru forestier, de graminées, de légumineuses ou de mulch d'imperata ; selon BARTHOLOMEW et *al.* (1953), le sol des jachères à graminées de 3 ans contient à peu près la même quantité de potassium que celui d'un recru forestier du même âge. A long terme, 10 à 40 ans, la forêt se révèle cependant comme le meilleur accumulateur de potassium (NYE et GREENLAND, 1960) ; ceci est certainement dû au volume énorme de la végétation de la grande forêt, mais, sans doute aussi, au fait que, trop souvent, les herbes brûlent et que, par conséquent, il n'y a pas de litière ; en outre, les cendres, après les feux, peuvent être entraînées au loin par la pluie et le vent.

1.5. LIXIVIATION DU POTASSIUM DANS LES SOLS

Susceptibilité du potassium à la lixiviation

Le potassium est l'élément majeur qui présente la plus forte intensité de recyclage (le « turn-over » des anglo-saxons) entre sol et végétation. NYE (1961) l'estime à 32 % par an par rapport à ce qui est contenu dans la végétation de la forêt ombrophile du Ghana, tandis qu'elle n'est que de 10 % pour le phosphore, 12 % pour l'azote et le calcium, 18 % pour le magnésium.

BERNHARD-REVERSAT (1973) chiffre l'apport annuel par les déchets végétaux d'une forêt du même type — mais située en basse Côte d'Ivoire — de 26 à 80 kg/ha de K suivant les stations, les trois quarts étant libérés pendant les deux premières semaines après la chute sur le sol. En outre, le pluvio-lessivage entraîne au sol par an une quantité pratiquement double de potassium, 60 à 170 kg/ha de K. Il est intéressant de noter que les 50 premiers centimètres du sol sous cette forêt ne contiennent guère que 80 à 160 kg/ha de potassium échangeable, soit les deux tiers de ce qu'il reçoit annuellement à partir de la végétation.

Etant donné cette forte mobilité dans la biomasse végétale et — on l'a vu précédemment — sa mauvaise rétention par le sol, il n'est pas étonnant que le potassium du sol soit très sensible à la lixiviation, nettement plus que les autres éléments majeurs ; cette lixiviation, mesurée expérimentalement sur une tranche de sol de 1,50 m de profondeur dans une forêt semi-décidue du centre de la Côte d'Ivoire, atteint, selon ROOSE (1970), 313 kg de K_2O par hectare et par an, chiffre très supérieur aux pertes similaires des autres éléments (154 kg/ha/an de C_aO, 142 kg/ha/an de M_gO, 124 kg/ha/an de N, 4 kg/ha/an de P_2O_5) (1).

Intensité de la lixiviation des engrais potassiques

Malgré la propriété du sol de régénérer, à partir de ses réserves, le potassium assimilable par les plantes, l'intensification progressive de l'agriculture sous les tropiques rend de plus en plus nécessaire une fourniture extérieure de potassium au sol.

Bien qu'il existe d'autres sources de potassium, le fumier de ferme notamment dont l'emploi est malheureusement trop peu répandu dans ces régions, ce sont les engrais minéraux qui retiendront ici l'attention, parce que c'est à eux que l'on a très généralement recours pour couvrir les besoins des plantes.

Or, ces engrais minéraux potassiques sont très facilement entraînés en profondeur par les eaux de drainage. Quelques exemples suffiront à le montrer : déjà LAUDELOUT (1950) indiquait que les deux tiers d'une forte fumure potassique appliquée sur palmier à huile quittaient en un an les 60 centimètres superficiels du sol jaune ferrallitique désaturé de Yangambi (Zaïre). Même observation faite par BOLTON (1968) sur les latosols à hévéa de Malaisie.

C'est à une profondeur un peu inférieure, 15 centimètres, que l'on retrouve au bout d'un an le potassium des engrais au Brésil, qu'il s'agisse des sols de l'Etat de São Paulo (MALAVOLTA, 1967) ou de ceux du Campo Cerrado (VAN WAMBEKE, 1971).

En Côte d'Ivoire méridionale, 50 à 60 % des engrais potassiques apportés, à vrai dire à forte dose (1 590 kg/ha de K_2O en 3 ans), sont enlevés par lessivage sous bananiers dans les sols ferrallitiques fortement désaturés sur schistes (GODEFROY, ROOSE et MULLER, 1970 et 1975).

Il apparaît ainsi que les engrais potassiques, s'ils ne sont pas absorbés immédiatement par la plante, ont les plus grandes chances d'être entraînés par les eaux de drainage et donc perdus pour l'agriculteur.

(1) A noter que cette lixiviation n'apparaît pas toujours nettement lorsqu'on essaie de l'apprécier par la seule mesure du potassium échangeable, car la transformation continue des réserves en potassium échangeable suffit parfois à la masquer (HAINNAUX et *al.*, 1973).

1.6. FACTEURS QUI INTERVIENNENT DANS LA LIXIVIATION DES ENGRAIS POTASSIQUES

La nature de l'argile

Lorsque le sol contient une certaine proportion d'illite, smectite ou vermicullite, il se produit une mise en réserve, par rétrogradation, du potassium des engrais (OLIVIN et OCHS, 1974 ; NG SIEW KEE, 1977). Mais la présence de ces argiles en quantité appréciable est rare dans les sols que l'on considère comme ferrallitiques, et, on l'a vu précédemment, la rétrogradation n'y existe guère.

La capacité de sorption du complexe d'échange pour le potassium

La plupart des sols ferrallitiques ont une fraction colloïdale composée exclusivement de kaolinite et d'hydroxydes métalliques. Bien qu'il n'y ait pas de rétrogradation au sens strict, on a constaté toutefois qu'une partie de la potasse apportée dans les sols très pauvres de la cuvette du Zaïre se retrouvait sous forme échangeable (LAUDELOUT, 1950), sans doute parce qu'il existait pour le potassium des sites préférentiels à pourvoir. STEPHENS (1969) a calculé que dans les sols du sud et de l'ouest de l'Ouganda, à peu près la moitié du potassium, contenu dans 750 kg de chlorure de potasse épandu par hectare en 6 ans, s'était fixée sur le complexe absorbant des sols étudiés, sauf dans trois cas qui concernent précisément les trois sols les mieux pourvus primitivement en potassium échangeable.

Ces exemples « rassurants » ne doivent pas faire oublier que cette capacité de fixation, sous forme de potassium échangeable, reste relativement faible. Ainsi, GODEFROY, ROOSE et MULLER (1975) n'arrivent pas à faire emmagasiner plus de 0,5 mé/100 g de K échangeable par les sols de bananeraies sur schiste en Côte d'Ivoire malgré des apports considérables de chlorure de potassium ; OCHS (1965) a démontré dans ce même pays que le sol, très désaturé sur sable tertiaire de Dabou, fortement carencé en potassium à l'origine avec 0,04 mé/100 g de K échangeable, pouvait fixer au plus 0,20 mé/100 g de potassium échangeable sans risque de le laisser échapper par lixiviation ; la différence correspond à une fumure de 450 kg de chlorure par hectare, soit 45 grammes au mètre carré ; pour cette dose précisément il y a très peu de pertes par drainage, mais tout apport plus important, ou simplement mal réparti, engendrera immédiatement la lixiviation du surplus.

Un tel ajustement des doses d'engrais aux capacités exactes du sol est fort difficile à réaliser.

On rejoint ainsi les conclusions de BARBIER (1962) pourtant établies à propos des sols tempérés : « *la véritable difficulté du problème est de savoir à quel niveau il convient d'entretenir le stock de potassium échangeable suivant les conditions pédoclimatiques* ».

Il y a tout de même là une possibilité de fixation sur le sol du potassium des engrais à ne pas négliger, mais aussi à ne pas surestimer.

L'environnement cationique

On a vu précédemment qu'un certain nombre de cations, principalement l'hydrogène, l'aluminium et l'ammonium, avaient la propriété de se fixer sur des sites d'échange possibles pour le potassium et, fait plus grave, d'être difficilement substitués par ce dernier élément sur le complexe absorbant.

En ce qui concerne l'ammonium, surtout celui qui est apporté par les engrais, l'équilibre délicat qui devrait être établi entre les doses et les dates d'épandage des fumures potassiques et azotées paraît si compliqué que la question est rarement abordée et encore

moins résolue. On a bien suggéré d'employer des nitrates de potasse (OLLAGNIER et OCHS, 1973), mais on risque une lixiviation accrue de l'azote.

Il semble d'ailleurs que l'urée soit nettement moins « lixiviante » pour le potassium que le nitrate d'ammonium et surtout le sulfate d'ammonium (NG SIEW KEE, 1977). Quant à l'hydrogène et à l'aluminium échangeable, un remède simple consiste à faire un chaulage préalable (BOLTON, 1968 ; RAMOS, 1971 ; TINKER et SMILDE, 1965) qui remplace ces cations par du calcium, lequel est alors beaucoup plus facilement déplacé par le potassium des engrais que les ions précédents.

Effectivement, il est démontré qu'un complexe absorbant bien saturé en calcium voit la lixiviation du potassium des engrais diminuer dans des proportions parfois considérables (COELHO et VERLENGIA, s.d. ; GODEFROY, POIGNANT et MARCHAL, 1971). Le tableau X.1. en donne une bonne illustration.

TABLEAU X.1. — *Influence de la saturation du complexe absorbant sur la lixiviation du potassium dans un sol de l'Etat de São Paulo (Brésil) d'après COELHO et VERLENGIA (s.d.)*

pH du sol	Saturation du sol en bases %	Lixiviation du K en % de l'apport
4,83	20	70
5,30	40	49
5,63	50	26
7,03	72	16

Importance de l'anion des engrais

Si certains cations ont la propriété de réduire ou de favoriser la fixation du potassium sous forme échangeable, il ne faut pas négliger l'action des anions auxquels cet élément est obligatoirement associé dans les engrais. Comme indiqué au paragraphe 5.2. de ce chapitre, on s'accorde à reconnaître à l'ion phosphorique (PO_4^{---}) la propriété de retenir le potassium, alors que le rôle de SO_4^{--} est discuté, tandis que Cl^- et NO_3^- n'ont aucune action en ce domaine. MUNSON et NELSON (1963) indiquent pour les sols tempérés la séquence suivante de facilité de lixiviation du potassium dans le sol en fonction de la nature des engrais.

$$KCl = KNO_3 > K_2SO_4 > K_2NPO_4 = KPO_3 > K_2CaP_2O_7$$

En ce qui concerne les sols ferrallitiques (ici un oxisol acide de la Trinidad), AHMAD et DAVIS (1970) suggèrent la succession suivante à la suite d'expériences de laboratoire :

$$K_2SO_4 > KNO_3 > KCl > KH_2PO_4$$

Quoiqu'il en soit, ces considérations sont rarement prises en compte dans la pratique agricole courante. L'engrais potassique le plus employé reste le chlorure parce que le meilleur marché. Le sulfate de potassium n'est utilisé que dans des cas particuliers bien précis (susceptibilité d'une plante à l'ion chlore, meilleure qualité des produits récoltés...). Quant aux nitrates et phosphates de potassium, leur usage est jusqu'à présent confiné surtout aux parcelles expérimentales et aux essais au champ et au laboratoire.

La pluviosité

Il est évident que l'entraînement du potassium en profondeur nécessite une certaine quantité d'eau percolant à travers un sol perméable. NG SIEW KEE (1977) a montré sur des colonnes de terre (latosol de Malaisie) que cet entraînement est sensiblement proportionnel au volume d'eau ajouté.

1.7. PRATIQUES AGRONOMIQUES DESTINEES A REDUIRE LA LIXIVIATION DU POTASSIUM

Ainsi qu'on l'a vu plus haut, les sols ferrallitiques ne peuvent guère fixer le potassium des engrais que sous forme échangeable, et ceci dans des proportions relativement modestes. L'idéal serait évidemment de saturer en potassium les sites d'échange possible et de ne fournir ensuite que ce qui est strictement nécessaire aux plantes. Or, la première donnée n'est pas facile à déterminer dans la pratique agricole de tous les jours, et d'autre part, les prélèvements par les racines sont échelonnés dans le temps contrairement aux épandages d'engrais.

La plupart des auteurs recommandent de fractionner les apports de potassium en deux fois sur les cultures annuelles, en 3, 4 et 5 fois, parfois jusqu'à 7 fois, sur les cultures pérennes. Malgré tout, les pertes peuvent être sévères lorsque les doses d'engrais deviennent importantes : 50 à 60 % des 1 590 kg de K_2O enlevés par lixiviation dans une bananeraie de Côte d'Ivoire malgré l'avidité bien connue du bananier pour le potassium (GODEFROY, ROOSE, MULLER, 1970).

Comme les besoins des cultures sont variables en fonction du développement végétatif, HUMBERT (1958) conseille d'attendre que les racines de la canne à sucre soient bien développées pour apporter des engrais potassiques : à partir de ce moment, les pertes par drainage seraient très réduites dans les latosols de Hawaï. C'est certainement pour la même raison, densité optimale des racines d'où une meilleure capacité d'interception, que ROOSE et TALINEAU (1973) constatent dans un essai d'engrais (N, P, K, Ca, Mg) à plusieurs niveaux que les pertes en potassium par lixiviation ont tendance à devenir négligeables dès que les plantes (Panicum maximum et Stylosanthes guyanensis traités en fourrage) sont convenablement alimentées en ce qui concerne les autres éléments essentiels.

1.8. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les agronomes œuvrant en région ferrallitique considèrent à juste titre que le potassium échangeable rend assez bien compte des disponibilités immédiates du sol en potassium pour les cultures. Il est peu abondant, parce que fixé préférentiellement sur des sites d'échange peu nombreux du complexe absorbant ; en outre, une certaine proportion est très fortement retenue sur une partie de ces sites (souvent 1,5 à 2 % de la capacité d'échange) et est de ce fait difficilement disponible pour les plantes.

Le potassium échangeable s'épuise vite en culture continue, mais il se régénère à partir des réserves du sol en potassium non échangeable, réserves infiniment plus abondantes dans la majorité des cas que le potassium fixé sur le complexe absorbant. Si l'on peut expliquer la mobilisation de ces réserves, mobilisation toujours partielle et lente en l'absence de libération du potassium rétrogradé, par l'altération des minéraux présents dans le sol, il semble que ce processus soit insuffisant pour rendre compte de ce phénomène dans les sols ferrallitiques évolués, apparemment dépourvus de tout résidu altérable de la roche-mère.

La lenteur de cette régénération impose, dans la pratique, la mise en jachère du sol pendant un minimum de deux à quatre ans après épuisement du potassium échangeable (souvent deux à quatre ans de culture pour les plantes sarclées, dix à quinze ans pour les cultures pérennes).

A défaut de jachère, il est nécessaire d'avoir recours aux engrais minéraux. Malheureusement ceux-ci sont soumis à une intense lixiviation dès que les sites préférentiels du potassium échangeable se trouvent saturés. La présence de calcium sur le complexe absorbant favorise cette rétention par le sol, alors que l'aluminium, l'hydrogène et l'ammonium

facilitent la lixiviation. La forme « phosphate » de l'engrais potassique diminue également les risques de lixiviation.

Mais il semble surtout qu'un des moyens les plus efficaces d'éviter ces pertes est d'adapter la fourniture de potasse aux besoins des cultures : apports échelonnés et fractionnés d'engrais, développement suffisant — au besoin aidé par des fumures — du système racinaire afin d'augmenter l'absorption de cet élément dans l'ensemble du sol.

2. DYNAMIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM

2.1. GENERALITES : LES DIVERS ASPECTS DE LA DYNAMIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNESIUM

Calcium et magnésium sont deux éléments très proches l'un de l'autre par la similitude de leurs propriétés. Dans les sols, on a l'habitude de considérer que leurs dynamiques respectives sont, sinon absolument identiques, du moins très voisines et pratiquement toujours parallèles. Dans tout ce qui suivra, il sera surtout question du calcium et du magnésium échangeables, formes les plus importantes pour l'alimentation des plantes.

Parmi les traits qui caractérisent cette dynamique, on peut citer :

Une évolution saisonnière du calcium et du magnésium échangeables

On a vu précédemment (chap. VIII, p.139) que l'ampleur n'en était pas toujours facilement décelable en climat équatorial sans saison sèche tranchée, qu'elle paraissait plus forte sous culture que sous végétation naturelle et sous climat à saisons fortement contrastées que sous climat humide toute l'année. En tout état de cause, ces variations saisonnières, même lorsqu'elles sont notables, ne paraissent jamais d'une intensité telle qu'elles puissent affecter l'alimentation des cultures.

Une transformation des réserves calciques et magnésiennes du sol en calcium et magnésium échangeables

Il a été exposé (chap. VIII, p. 138) qu'elle était mal connue, surtout parce qu'on ignore à peu près tout de la nature des formes non-échangeables de ces deux éléments en sols ferrallitiques. N'ayant que fort peu d'information sur la base de départ, il est difficile d'en obtenir sur les mécanismes de transformation. Rappelons ce qui déjà fut dit à ce propos en guise de conclusion, à savoir que les réserves calciques apparaissent plus facilement mobilisables, mais beaucoup moins abondantes que les réserves magnésiennes dans les sols ferrallitiques où les minéraux primaires ont pratiquement disparu — à l'exception de la muscovite encore présente parfois dans un certain nombre de sols — et où les minéraux secondaires (argiles) n'apparaissent pas capables d'enfermer des quantités notables de magnésium (la kaolinite est très largement dominante).

On connaît fort mal également la façon dont les amendements comportant calcium et magnésium (calcaires, dolomies, chaux diverses, phosphates tricalciques) les cèdent aux colloïdes du sol (argile-humus). C'est d'ailleurs un fait bien constaté qu'une bonne partie de ce calcium et de ce magnésium sont évacués assez vite et facilement par drainage, sans que les solutions qui les transportent en échangent une partie avec le complexe absorbant, parfois très fortement désaturé, des horizons qu'elles traversent (BOYER, 1976).

Une lixiviation intense

C'est le phénomène essentiel qui sera étudié ici comme caractérisant au premier chef la lixiviation du calcium et du magnésium en milieu ferrallitique.

Evidemment, on fait abstraction ici de ces sols pourtant ferrallitiques par leur profil, mais fortement saturés ou sursaturés en calcium et magnésium, évidemment neutres, parfois même alcalins ; ces sols ne manifestent aucune trace de désaturation même légère. Pratiquement, il s'agit toujours de situations exceptionnelles : sol recevant des eaux de ruissellement très chargées en cations alcalins et alcalino-terreux au Kivu (Zaïre) (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958), sols fort peu épais — 10 à 40 cm — dérivés de calcaire dur à Cuba (SEGALEN, com. pers.), sols issus de calcaires plus ou moins altérables, relativement plus épais — 1 à 2 m — en état avancé non seulement de recalcification mais de recalcarification dans l'ouest de l'état de Bahia au Brésil (RICHE, com. pers.). Ce dernier sol — qui présente toutes les caractéristiques externes d'un sol ferrallitique, précisons-le bien — est tout-à-fait symptomatique des avatars qui peuvent affecter un sol au cours de son histoire : il s'est certainement formé sous un climat chaud et humide, et a du alors être soumis à une désaturation plus ou moins avancée ; puis un climat du type tropical aride ou semi-aride a entraîné une dominance des mouvements « per ascensum » des solutions sur les mouvements « per descensum » avec formation d'accumulations calcaires et même d'encroutements ; on peut ajouter, pour compléter ce panorama, que le climat actuel, semi-aride avec 800 mm de pluie de moyenne annuelle (mais avec de fortes irrégularités suivant les années), paraît provoquer une régression de cette carbonatation, les phénomènes d'entraînement par drainage étant apparemment à nouveau devenus prépondérants (RICHE, idem).

Si on a intentionnellement insisté sur ces cas où la lixiviation ne se manifeste pas, ou en tout cas n'influe pas sur le bilan du calcium et du magnésium, c'est en grande partie pour souligner leur caractère exceptionnel, qu'il s'agisse de la proximité, génante au point de vue agricole, de la roche-mère, de situations aberrantes de pédo-climat, ou de climat tout court.

Rien dans tout cela qui les relie aux sols ferrallitiques « classiques », sinon leur génèse trop récente ou au contraire très ancienne et « erratique » par rapport au climat actuel. Dans l'immense majorité des sols ferrallitiques, le phénomène essentiel qui affecte la dynamique du calcium et du magnésium est sans conteste la lixiviation. C'est en tout cas le plus connu et apparemment de beaucoup le plus important.

2.2. SUSCEPTIBILITE A LA LIXIVIATION DU CALCIUM ET DU MAGNESIUM

Susceptibilité par rapport aux autres nutriments (Azote - Phosphore - Soufre - Potassium)

Malgré une susceptibilité importante, le calcium et le magnésium ne sont pas les éléments chimiques du sol les plus sensibles à l'entraînement en profondeur par les eaux de drainage : ainsi sous une forêt de Côte d'Ivoire, les pertes annuelles en potassium (314 kg/ha de K_2O) arrivent en poids d'oxydes à plus du double de celles du calcium et du magnésium, respectivement 156 et 142 kg/ha de CaO et de MgO, qui elles-mêmes se révèlent assez semblables à celles de l'azote, 126 kg/ha de N, et très supérieures à celles en phosphore pratiquement pas touché par la lixiviation, 4,5 kg/ha de P_2O_5 (ROOSE, 1970). Il importe toutefois de faire une réserve en ce qui concerne l'azote : l'exemple ci-dessus concerne un sol forestier, donc, à l'état stable, acide (pH 5,1), où la majorité de l'azote libérée par la minéralisation de la matière organique est rapidement recyclée par la végétation ; une minéralisation intense de l'humus, par exemple après un défrichement, conduirait à un entraînement proportionnellement plus important que dans le cas de la forêt, même en tenant compte des accroissements de pertes en calcium et magnésium à la suite de cette opération.

Même si ce n'est pas le cas en sol couvert de végétation naturelle (forêt ou savane), on considère de façon globale que, dans les sols cultivés, avec ou sans engrais minéraux, la susceptibilité à la lixiviation s'établit ainsi :

$$N > K > Ca > Mg > P$$

Le soufre n'est pas nommé dans cette énumération. Moins abondant dans les sols que les autres nutriments cités ci-dessus, son comportement s'apparente à celui de l'azote : sa lixiviation, faible sous végétation naturelle, s'accélère fortement dès qu'il y a minéralisation accélérée de la matière organique. Mais plus que l'ion NO_3^-, l'ion SO_4^{--} est relativement bien retenu par les colloïdes du sol, de telle sorte qu'on peut observer des accumulations — toutes relatives d'ailleurs — de soufre sous forme de sulfates dans les horizons profonds des sols (HESSE, 1957).

Susceptibilité comparée du calcium et du magnésium des sols

Si l'on consulte la littérature agronomique, il paraît acquis que les dynamiques du calcium et du magnésium sont sensiblement parallèles dans les sols et que les sensibilités à la lixiviation sont assez voisines. Mais un certain nombre d'expérimentations, effectuées principalement en Afrique, amènent à nuancer cette appréciation.

Parfois, il s'agit d'un départ préférentiel du magnésium par rapport au calcium, comme l'a constaté MARTIN G. (1970) dans les sols ferrallitiques argileux fortement désaturés de la vallée du Niari (Congo) où le rapport calcium-magnésium qui est de 8,5 sous savane passe à 22 après trois ans de culture.

Toujours en sols fortement désaturés, mais à Madagascar cette fois, les pertes en calcium et magnésium sont identiques, 0,10 milliéquivalent pour 100 grammes de sol pour chacun d'eux, sous culture (CELTON, ROCHE et VELLY, 1973). Il est vrai qu'il s'agit d'un sol carencé en magnésium. C'est à un résultat apparemment similaire que parvient ROOSE (1970) pour un sol ferrallitique moyennement désaturé, couvert de forêts, près de Divo en Côte d'Ivoire, 142 kg/ha de CaO et aussi de MgO ; mais si on fait la conversion en milliéquivalent, la lixiviation du magnésium est un peu supérieure à celle du calcium (70.10^5 milliéquivalents de Mg et $55{,}5.10^5$ milliéquivalents de calcium par hectare). Dans les sols sablo-argileux ferrallitiques faiblement désaturés de Casamance (sud du Sénégal), avec un horizon superficiel relativement bien pourvu en bases avant défrichement, le rapport Ca/Mg, originellement de 2,15, tombe à 1,14 après quinze ans de culture mécanisée (FAUCK, MOUREAUX, THOMANN, 1969), ce qui implique une lixiviation du calcium proportionnellement supérieure à celle du magnésium. QUANTIN (1965) relate un comportement semblable dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés de la République Centrafricaine, plus argileux que les précédents, mais assez bien saturés en bases, eux aussi, dans leur partie superficielle.

Qui du calcium ou du magnésium est préférentiellement lixivié ? Les résultats globaux des expériences citées ci-dessus s'avèrent contradictoires. Or, d'après des constatations faites sur des sols de France, on s'est aperçu que plus on appauvrissait un sol en calcium, plus on assistait à une évacuation préférentielle du magnésium par les eaux de drainage (DEMOLON, 1952). Il en est de même pour les sols d'Ecosse et d'Angleterre où l'intensité de la lixiviation du magnésium est inversement proportionnelle à la saturation en calcium du complexe absorbant (SALMON, 1963).

D'un point de vue très général, ce phénomène apparaît affecter de la même façon tous les sols soumis à la lixiviation de par leur environnement climatique, et cela qu'il s'agisse des sols tempérés acides du sud-ouest de la France (CLAIRON, 1969) ou des sols ferrallitiques fortement désaturés de basse Côte d'Ivoire (GODEFROY, POIGNANT et MARCHAL, 1969) ; de fait, on a remarqué dans ces sols de Côte d'Ivoire qu'un apport de chaux réduisait sensiblement la lixiviation du magnésium et aussi du potassium dans un sol cultivé en ananas, grâce à une meilleure saturation en calcium des colloïdes argilo-humiques (GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL, 1976) ; en outre, selon TINKER et SMILDE (1963), la lixiviation engendrée par le sulfate d'ammoniaque affecte essentiellement le calcium et fort peu le

magnésium dans les sols ferrallitiques carencés en magnésium des plantations d'Elaeïs guinéensis du sud du Nigéria (sols ferrallitiques fortement désaturés sur sables tertiaires). C'est à une conclusion analogue qu'aboutit SIBAND (1972), après avoir étudié l'effet de 60 à 80 ans de cultures traditionnelles (entrecoupées de jachères de durées fort variables d'ailleurs) sur le calcium et le magnésium des sols de Haute-Casamance (Sénégal méridional) : le calcium, originellement le plus abondant, est entraîné par lixiviation plus vite et plus profondément que le magnésium, bien que, évidemment, ce dernier soit aussi affecté.

Il semble donc facile de conclure que la lixiviation porte préférentiellement sur l'élément (calcium ou magnésium) « relativement » le plus abondant. Malheureusement, on arrive fort mal à cerner ce que recouvre cet adverbe ; en principe, le rapport Ca/Mg devrait être un bon indicateur des susceptibilités respectives à l'entraînement par drainage, mais on ne trouve guère de corrélation nette. Sans doute faudrait-il combiner entre eux un ensemble de facteurs : rapport Ca/Mg, taux de saturation du complexe absorbant en chacun des deux cations, type de pédogénèse probablement...

Influence de la végétation sur les susceptibilités relatives du calcium et du magnésium à la lixiviation

Jusqu'à présent on a parlé de lixiviation au sens large, en sous-entendant seulement un entraînement en profondeur par les eaux de drainage.

Il ne faut pas oublier l'action de la végétation qui vient encore compliquer un schéma déjà complexe. Il semble en effet que les racines des plantes recyclent le magnésium avec beaucoup plus d'énergie que le calcium, contrariant ainsi beaucoup sa lixiviation (TINKER et SMILDE, 1963). De ce fait, GODEFROY et *al.* (1972) trouvent en dix ans une stabilité certaine des teneurs en magnésium, alors que les taux de calcium ont baissé de moitié dans la partie supérieure d'un sol (0-25 cm) de la basse Côte d'Ivoire enrichi en ces éléments par l'incinération préalable de la forêt et maintenu ensuite sous un couvert dense d'herbes.

Il serait toutefois erroné de penser que la végétation, quelle que soit sa nature, agit toujours en préservant plus le magnésium que le calcium dans tous les sols. On constate en effet que dans certains sols ferrallitiques de l'état de Bahia au Brésil, sols issus de roches plutoniques assez nettement magnésiennes, les horizons B et C montrent une assez nette supériorité quantitative du magnésium échangeable sur le calcium échangeable, alors que c'est l'inverse qui se produit dans l'horizon superficiel humifère (rapport Ca/Mg légèrement supérieur à 1) ; logiquement on doit penser que la végétation — ici une végétation naturelle forestière — en est responsable. Dès qu'il y a défrichement et culture, bien souvent le magnésium arrive à dominer assez vite le calcium. Peut-être est-ce à cause du décapage superficiel dû à l'érosion ? Ce n'est pas certains dans tous les cas.

Il reste donc beaucoup d'inconnues dans cette action de la végétation sur la lixiviation comparée du magnésium et du calcium du sol.

2.3. MECANISME DE LA LIXIVIATION

Importance de la minéralisation de la matière organique

Les processus de transformation de l'azote organique en azote minéral représentent l'une des causes fondamentales de la lixiviation des bases (FAURIE, 1977).

Dans un premier temps, l'ammonium formé se substitue, sur le complexe absorbant, au calcium et au magnésium qui sont alors libérés et sensibles à la lixiviation. Mais ceci n'a qu'une importance réduite dans le phénomène qui nous intéresse. L'essentiel de la lixiviation des bases, et en particulier du calcium, est dû à la nitrification proprement dite, c'est-c'est-à-dire à la transformation de l'azote ammoniacal en azote nitrique.

$$NH_4 + 2\,O_2 \rightarrow NO_3^- + 2\,H^+ + H_2O$$

ainsi la formation de *UN* NO_3^- à partir de *UN* NH_4^+ provoque la libération de 2 H^+ susceptibles de désorber *UN* Ca (FAURIE, op. cit.).

Il est évident que ce processus a une portée tout à fait générale et qu'il explique pourquoi un sol a naturellement tendance à laisser échapper ses bases par lixiviation, ne serait-ce que parce que l'azote de l'humus est en perpétuelle évolution (pour que la lixiviation ait effectivement lieu, il faut d'abord que le drainage l'emporte sur l'évapo-transpiration, mais on sait que c'est une situation habituelle en milieu ferrallitique).

Action acidifiante des cultures de légumineuses

Une plante qui s'alimente en azote à partir des nitrates du sol, sels neutres, prélève plus d'anions NO_3^- que de cations ; elle laisse donc dans le sol un excès de cations (PIERRE, MEISINGER, BIRCHETT, 1970), lequel, évidemment, peut compenser les effets acidifiants de la formation des nitrates à partir de l'humus.

Il n'en est pas de même dans le cas d'une culture de légumineuses ; on constate que, s'il y a fixation symbiotique de l'azote de l'air par les rhizobiums des nodosités, la plante prélève dans le sol uniquement des cations, laissant pour compte les anions NO_3^-, d'où une acidification du sol. TITUS NYATSANGA et PIERRE (1973) calculent que, dans ces conditions, une récolte de 10 tonnes de luzerne développe une acidité telle que, pour la neutraliser, il faudrait 600 kg de carbonate de calcium par hectare.

Il ne semble pas que l'on ait cherché à chiffrer de cette sorte l'acidité induite par une culture d'arachide en sols ferrallitiques. Mais elle n'est surement pas négligeable.

Lixiviation du sol à la suite d'apports d'engrais azotés

Déjà en 1881, trois agronomes anglais LAWES, GILBERT et WARRINGTON mettaient en garde contre les pertes de bases générées par les sels d'ammonium : « The action of ammonium salts in impoverishing a soil of lime and magnesia should always be born in mind when their application to a soil poor in lime is in question ». Ce qui est vrai dans les sols anglais l'est certainement à plus forte raison dans les sols ferrallitiques à capacité d'échange faible et souvent mal pourvus en cations.

En ce qui concerne le sulfate d'ammoniaque, les observations de divers auteurs (CHAMPION et *al.*, 1958 ; DUGAIN, 1959 ; FORSTER, 1970 ; STEPHENS, 1969, etc.) conduisent à penser que chaque apport de 200 kg d'azote (environ une tonne de sulfate d'ammoniaque) provoque une baisse de pH de 0,20 à 0,25 unité pH pour des sols de réaction voisine de pH 5,5. C'est loin d'être négligeable même à moyen terme.

Il paraît difficile d'imputer à l'anion SO_4^{--} la seule responsabilité du départ des bases dans les sols. En fait, tous les engrais azotés acidifient le sol, ne serait-ce que par ce qu'ils développent de l'ammonium, lequel se transforme en nitrate. Ainsi sous une prairie de pangolagrass en Colombie (CROWDER, MICHELIN et BASTIDAS, 1962),

- avec 336 kg/ha d'urée, le pH reste stable
- avec 1 008 kg/ha d'urée, le pH baisse de 6,5 à 5,8
- avec 4 032 kg/ha d'urée, le pH baisse de 6,5 à 5,0.

Ces diminutions de pH reflètent bien évidemment l'amenuisement du stock de cations du complexe absorbant.

L'élimination des bases par les eaux de drainage se produit principalement sous forme de nitrates (TOURTE et *al.*, 1958) et surtout de nitrate de calcium, le magnésium paraissant proportionnellement moins affecté (sans doute en raison de fortes remontées par la végétation d'après TINKER et SMILDE, 1963). Pour être complet ajoutons que le potassium paraît nettement moins sensible que les ions bivalents à l'entraînement sous forme de nitrates (DJOKOTO et STEPHENS, 1961).

Dans le propos qui nous intéresse, il paraît fort utile de calculer les pertes de calcium et de magnésium provoquées par les engrais azotés. On obtient ce résultat indirectement, en compensant ces pertes par des apports d'amendements calco-magnésiens. Le tableau X.2. indique, en équivalent de carbonate de calcium, les quantités nécessaires pour neutraliser l'acidité développée par les divers engrais azotés, tableau proposé pour les sols de l'île de Puerto Rico, sols qui sont pour une bonne part ferrallitiques.

TABLEAU X.2. — *Quantité de $CaCO_3$ nécessaire pour neutraliser l'acidité développée par les engrais azotés d'après* VINCENTE-CHANDLER *et* al. *(1964)*

Type d'engrais	Teneur de l'engrais en N	Besoins en Ca CO_3	
		En kg (par kg de N)	En tonne (par tonne d'engrais)
Ammoniac ($OH\ NH_4$)	23,6 %	6,1	1,5
Urée	46 %	2,0	1,0
Nitrate de NH_4	33,5 %	1,9	0,6
Sulfate de NH_4	21 %	5,8	1,2

Un autre moyen d'éviter cette acidification est d'employer des engrais azotés du type nitrate de calcium et cyanamide calcique, où il y a équilibre entre anion et cation (ici Ca). L'expérience prouve qu'alors il n'y a pas acidification du sol (VERLIERE, 1967) ; il n'en reste pas moins qu'une certaine quantité de calcium, au plus à peu près équivalente à l'apport, est tout de même lixiviée. L'ennui est que ces engrais sont chers ; en outre, pour la forme nitrate on craint, légitimement, une perte rapide par les eaux de drainage, donc une perte sèche pour l'agriculteur (le nitrate de sodium, nitrate du Chili, est déconseillé en sols ferrallitiques en raison de sa teneur en sodium, mais lui non plus n'est pas acidifiant).

Toutes ces considérations sur l'acidification engendrée dans les sols par les engrais azotés — acidification souvent plus sensible en sols ferrallitiques que dans beaucoup d'autres sols — ont pu faire oublier un instant les mécanismes en jeu ; rappelons que ceux-ci sont exactement les mêmes que si l'azote provenait de l'humus du sol :

— Substitution sur le complexe absorbant des ions Ca et Mg par NH_4

— Elimination d'un Ca (ou Mg) supplémentaire par les deux H^+ engendrés par la transformation de NH_4 en NO_3^-

— Combinaison des NO_3^- avec les cations libres, en l'occurence surtout Ca et Mg.

Le nitrate ainsi formé est très facile à lixivier... à moins qu'une racine ne l'absorbe, rejetant par la même occasion une partie du Ca et du Mg (lesquels peuvent alors se fixer à nouveau sur le complexe absorbant).

2.4. FACTEURS DE LA LIXIVIATION

On a vu dans le paragraphe précédent qu'en définitive le mécanisme principal de la lixiviation des bases, principalement du calcium et du magnésium, provenait des processus de transformation de l'azote en nitrates (qu'il s'agisse de l'azote organique « naturel » ou de celui apporté sous forme ammoniacale par les engrais). Mais pour qu'il y ait lixiviation, il faut qu'il y ait élimination de ces nitrates sinon hors du sol, du moins hors de la portée des racines absorbantes.

Le drainage

Il est bien connu que, d'une façon générale, ce sont les sols développés sous les climats les plus humides qui contiennent le moins de calcium et de magnésium. L'expérience acquise par les pédologues francophones, tant en Afrique Occidentale qu'à Madagascar, les amène à penser que des pluviosités moyennes supérieures à 1 700 mm engendreraient pratiquement toujours des sols ferrallitiques fortement désaturés quelle que soit la roche-mère. Par contre, la réciproque n'est pas vraie : il existe de nombreux sols fortement désaturés sous des pluviométries allant de 1 000 à 1 500 mm.

A vrai dire, ce n'est pas tant la quantité d'eau de pluie qui importe que celle qui percole à travers le sol. Aussi n'est-il pas étonnant que les sols de Bouaké, en Côte d'Ivoire, (1 200 mm de pluie, drainage 100 mm) soient relativement bien pourvus en bases tandis que ceux d'Abidjan (2 100 mm de pluie, 1 000 mm de drainage) souffrent d'une forte désaturation. Si la quantité de pluie a évidemment beaucoup d'importance dans le drainage, on doit en plus tenir compte de son intensité (NG SIEW KEE, 1977), c'est-à-dire de sa concentration dans le temps, et aussi de l'évapotranspiration, important facteur de réduction du drainage. C'est probablement, au moins partiellement, pour ces raisons que les sols de Bouaké (1 200 mm de pluie assez bien répartis sur environ neuf mois), sont relativement fort peu désaturés par rapport à ceux de la vallée du Niari au Congo (1 200 mm de pluie en 6 à 7 mois en averses brutales et saison sèche très embrumée), ou à ceux du sud du Brésil (1 200 mm de pluie de mousson tombant surtout d'Octobre à Avril avec hiver très frais réduisant l'évaporation de mai à septembre).

Les teneurs du sol en calcium et en magnésium échangeables

D'après ce qui précède, on pourrait s'attendre à ce qu'en Côte d'Ivoire, les sols du sud de la zone cotonnière qui reçoivent en moyenne 1 200 mm de pluie, dont 1 000 en 7 mois, perdent nettement moins de calcium et de magnésium que les sols du nord de ce pays avec 1 400 mm de pluie dont 1 100 tombent en 5 mois, ceci avec des traitements culturaux similaires. Or, c'est parfois le contraire qui se produit, et SEMENT (1980) attribue cette inversion au fait que les sols du nord, nettement plus désaturés que ceux du sud, retiennent leurs cations avec beaucoup plus d'énergie (il s'agit évidemment du nord et du sud de la zone d'extension des cultures cotonnières en Côte d'Ivoire qui correspond à peu près à celles des savanes, et non de ce pays pris dans son ensemble) ; de telle sorte que pertes en calcium et magnésium sont quantitativement supérieures pour les pluviométries les plus faibles et, en fait, elles seraient proportionnelles à la saturation en bases du complexe absorbant (SEMENT, op. cit.)... si l'on ne tient pas compte du drainage.

Le tableau X.3. illustre bien ces faits en chiffrant les quantités de calcium et de magnésium entraînées. Il réunit trois exemples pris également en Côte d'Ivoire, mais cette fois-ci en zone forestière ; ceux-ci portent, le premier sur une jeune plantation d'hévéas à Anguédougou (drainage vertical 845 mm par an), le second sous forêt à Divo (drainage 500 à 600 mm par an), le troisième sous bananeraie à Azaguié (drainage 450 à 650 mm/an suivant les années). La lixiviation est incomparablement plus forte dans le sol de bananeraie d'Azaguié fortement enrichi par des amendements calco-magnésiens mis à hautes doses, que sous la forêt de Divo (sol moyennement désaturé), et surtout que dans les pauvres sols plantés en hévéas d'Anguédougou. Il faut ajouter que les bananiers d'Azaguié reçoivent, en plus de la dolomie, une fumure minérale N.P.K. comportant de l'urée ou du sulfate d'ammoniaque dont on verra plus loin qu'ils favorisent, entre autre, le départ du calcium et du magnésium : il faut donc voir dans les chiffres cités ici le sens d'un phénomène et ne pas trop chercher à calculer une proportionnalité stricte qui serait illusoire.

TABLEAU X.3. — *Lixiviation et teneur de l'horizon superficiel du sol en calcium et en magnésium en Côte d'Ivoire*

	Prof. cm	Teneur du sol (cations échangeables)		Lixiviation annuelle		Source
		Ca mé/100 g	Mg mé/100 g	CaO kg/ha	MgO kg/ha	
Anguedougou Hévéa	0-10	1,0	1,0	44	67	ROOSE (1970-a)
Divo Forêt secondaire	0-10	2,86	1,53	154	142	ROOSE (1970-b)
Azaguié* Bananeraie	0-25	4,20	1,0	365	149	GODEFROY, ROOSE et MULLER (1975)

* Sol maintenu à haut niveau de fertilité par des apports constants de dolomie.

La couverture végétale du sol

Si l'on essaie de schématiser l'influence de la végétation sur la lixiviation des bases dans le sol, on peut la créditer d'un rôle direct et d'un rôle indirect.

Rôle direct de conservation des bases

La végétation prélève dans la solution du sol une certaine quantité de nutriments (en particulier les bases échangeables) qui, sans elle, seraient entraînés par les eaux de drainage. Elle les restitue ensuite à la partie superficielle du sol avec les débris végétaux (y compris les résidus des récoltes). Ces apports organiques contribuent à préserver le stock d'humus en perpétuelle évolution et recyclage, dont on sait qu'il forme une bonne part de la capacité d'échange, et, partant, conditionne la faculté du sol à retenir les cations (la destruction de 40 à 50 % de l'humus, au cours des deux premières années de culture suivant le défrichement, provoque la disparition d'à peu près la moitié des éléments échangeables adsorbés sur le complexe d'échange selon FAUCK, MOUREAUX et THOMANN (1969) en Casamance (sud du Sénégal), BOUCHY (1973) en Côte d'Ivoire, etc. pour s'en tenir à l'Afrique occidentale).

Rôle indirect sur le bilan hydrique des sols

Une couverture végétale abondante et de belle venue évapore une importante quantité d'eau et, de ce fait, réduit d'autant la percolation des eaux de pluies à travers le sol, donc diminue l'importance d'un facteur essentiel de la lixiviation, à savoir le drainage.

Son élimination entraîne, en ce qui concerne le drainage, deux conséquences opposées : d'une part, le volume des eaux en transit devrait augmenter du fait de la suppression de l'évapo-transpiration végétale ; d'autre part, la diminution de la perméabilité superficielle du sol maintenu nu favorise le ruissellement et donc réduit d'autant le drainage. En fait, il apparaît que c'est le deuxième phénomène qui domine, comme l'a montré ROOSE (1973) sur les sols ferrallitiques sablo-argileux de basse Côte d'Ivoire pourtant naturellement perméables : un ruissellement superficiel très faible sous forêt, 0,9 % des pluies, passe à 31,3 % en sol nu, tandis que le drainage diminue de 43,2 % à 22 % de la pluviosité totale annuelle.

Comparaison végétation naturelle, plantes cultivées, sol nu

Par ses effets directs ou indirects un couvert végétal dense contribue, très efficacement, à diminuer la lixiviation des bases échangeables.

C'est évidemment la végétation naturelle ou celle d'une jachère de belle venue qui détiennent l'efficacité optimale. Et maintenir le sol nu est le pire des traitements que l'on puisse infliger au sol : ainsi, dans la vallée du Niari au Congo, les pertes de calcium sont de 250 kg de CaO par hectare sous arachides (deux cycles couvrent à peu près la période des pluies) et de 500 à 1 000 kg de CaO par hectare si le sol est conservé nu (MARTIN G., 1967). Le tableau X.4., emprunté à JAIYEBO et MOORE (1964), montre dans un sol ferrallitique près d'Ibadan (Nigéria) la supériorité du recru forestier sur les jachères herbacées vivantes et mortes pour le maintien et la reconstitution de la fertilité, et le véritable désastre que représente, à ce point de vue, le sol nu.

TABLEAU X.4. — *Comparaison de quelques caractéristiques du sol ferrallitique faiblement désaturé après six années sous divers types de jachères près d'Ibadan (Nigéria) d'après JAIYEBO et MOORE (1964)*

Type de jachère	pH	Ca échang. me/100 g	Mg échang. me/100 g	Capacité d'échange me/100 g	Matière organique %
Sol nu	6,8	3,3	0,6	4,6	1,5
Mulch d'Imperata	6,5	2,2	1,2	5,6	2,3
Cynodon plectostachus	7,1	5,0	1,4	6,4	1,8
Pueraria phaseolides	6,4	5,0	1,4	7,2	3,4
Recru forestier	6,6	7,0	1,8	9,3	4,4

Il paraît intéressant d'insister un peu sur le résultat assez curieux obtenu avec le « mulch » d'Imperata ; si ce dernier conduit à une augmentation, certes insuffisante, mais somme toute honorable de la teneur en matière organique et en magnésium ainsi que de la capacité d'échange, il provoque une diminution substantielle du taux de calcium échangeable qui retentit sur le pH, et ceci par rapport à tous les autres traitements y compris le sol nu. Quelques mots d'explication paraissent utiles.

Le paillage du sol par des débris végétaux, généralement des herbes coupées dans les parcelles voisines des champs cultivés, possède de nombreux avantages : il supprime toute érosion, il enrichit le sol en matière organique et lui cède les éléments minéraux qu'il contient ; il contrôle bien des adventices s'il est assez épais ; enfin il améliore le bilan hydrique, ce qui est souvent le principal but recherché, en conservant l'humidité lors des périodes sèches. Mais il a une conséquence nuisible souvent méconnue : parce qu'il diminue l'évaporation du sol et qu'il favorise l'infiltration de l'eau de pluie, il augmente le drainage et contribue par là-même à la lixiviation des bases.

Le tableau X.4. indique, en ce qui concerne ce dernier point que, par rapport au sol nu, le bilan est positif pour le magnésium, négatif pour le calcium. Mais normalement on ne paille pas un champ pour « voir » ce qui va se passer comme dans l'expérience de JAIYEBO et MOORE (1964), mais pour protéger une culture qui, elle, va évaporer l'eau du sol d'autant plus intensément que le substrat reste humide pendant les périodes sèches, de telle sorte que le solde entre éléments apportés par le paillis et enlevés par un drainage supérieur à la moyenne est habituellement excédentaire.

Quant aux plantes cultivées, on s'accorde à considérer que leurs effets sur la lixiviation des bases est à peu près intermédiaire entre ceux du sol nu et ceux de la végétation naturelle ou de jachères. Ainsi, FREITAS et VAN RAIJ (1975) trouvent que dans un « latosol »

du Campo Cerrado pauliste du Brésil, sol acide (pH superficiel allant de 4,5 à 5,5) et pauvre en bases (Ca + Mg variant de 0,7 à 1,4 mé/100 g suivant les objets), les pertes en bases par lixiviation sous culture s'établissent en moyenne à 0,25 mé/100 g par an entre 1964 et 1967, ce qui correspond à 140 kg/ha/an de CaO. C'est le chiffre de ROOSE (1970) sous forêt de Côte d'Ivoire (en sol faiblement désaturé et avec 1 600 mm de pluie), qui est très inférieur à celui du sol nu ferrallitique fortement désaturé de la vallée du Niari au Congo — 500 à 1 000 kg/ha/an de CaO —, la pluviosité, 1 200 à 1 300 mm, étant à peu près la même dans la vallée du Niari et cette partie du Campo Cerrado Brésilien.

Il faut faire ici une place spéciale aux plantations pérennes du type palmier à huile, caféier, cacaoyer, hévéa. Les plantes de couverture habituellement semées au stade jeune de ces cultures, puis l'ombrage développé ensuite rétablissent au mieux un « climax » forestier qui réduit au minimum les pertes par lixiviation.

OLLAGNIER et *al.* (1978) ont suivi pendant 14 ans l'état d'un sol ferrallitique fortement désaturé, issu des sables tertiaires de Côte d'Ivoire : la forêt qui le couvrait fut abattue puis brûlée à feux contrôlés ; les bois qui restaient furent andainés un rang sur deux et, après semis de la légumineuse de couverture, on y planta de jeunes palmiers à huile. Immédiatement après le brulis, la somme des bases échangeables de l'horizon 0 à 30 cm (de l'ordre de 1 me/100 g sous forêt) tripla pratiquement, tandis que le pH passait de 4,4 à 5,1, avant de décroître dès la deuxième année à un niveau encore légèrement supérieur à celui du sol sous forêt. Un nouveau maximum survint vers la quatrième année, correspondant bien évidemment à la décomposition totale des bois andainés et des racines dans le sol. Puis, s'amorça une lente décroissance jusque vers la neuvième année et, enfin, une stabilisation de la somme des bases échangeables en moyenne à 90 % du niveau existant précédemment sous forêt intacte, les pH sous palmiers (4,8 et 4,8) restant légèrement supérieurs à celui du sol sous forêt (4,3) (Figure XVIII).

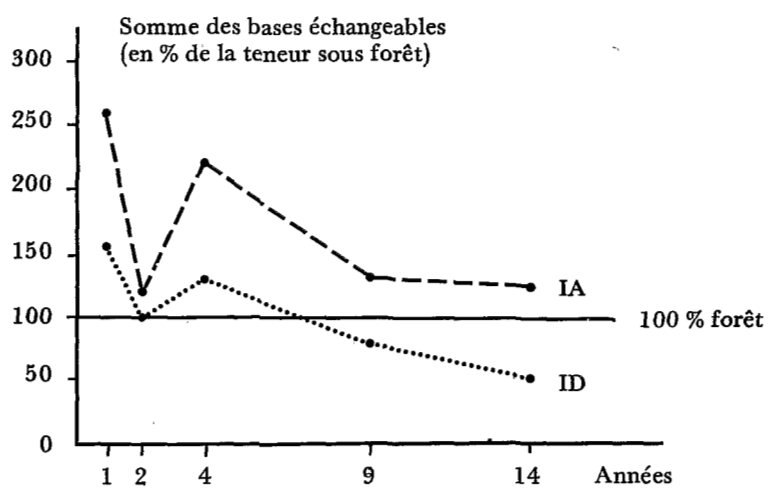


FIGURE 18

Evolution de la somme des bases échangeables dans l'horizon 0-30 cm d'un sol de palmeraie (Elaeis guineensis) *à La Mé (Côte d'Ivoire) d'après* OLLAGNIER *et* al. *(1978)*

Il paraît assez facile de conclure qu'un très léger apport d'éléments chimiques (Ca, Mg, et... K), en particulier pour compenser les exportations par les récoltes, suffirait à conserver en totalité la fertilité initiale, d'autant plus que les autres paramètres, matière organique, azote, phosphore, montrent ou stabilité ou augmentation.

Les engrais minéraux

Les engrais azotés

On a vu précédemment que l'apport d'engrais azotés, quelle que soit leur forme, équivalait à un apport d'anions NO_3^- (seuls font exception les nitrates de calcium et de sodium, la cyanamide calcique, ... relativement peu utilisés). D'où un risque important de lixiviation du calcium et du magnésium sous forme de nitrates... sauf si la plante absorbe cet azote.

L'idéal serait de fournir les engrais azotés au fur et à mesure des besoins de culture, ce qui est plus facile à dire qu'à réaliser en pratique agricole de tous les jours. On fait souvent l'épandage de ces engrais en deux fractions sur les cultures annuelles comme le cotonnier, jusqu'à 7 fractions annuelles dans certaines bananeraies... et ceci implique un important surcroît de dépense.

Cette technique peut donner de bons résultats : ainsi ROOSE et TALINEAU (1973) relatent que, dans une prairie fauchée de Panicum maximum, le bilan de l'azote du sol est positif pour les plus fortes doses d'engrais azotés (1 063 et 2 065 kg/ha de N en trois ans sous forme d'urée et de sulfate d'ammoniaque), d'où une faible lixiviation sous forme de nitrates. Les formes des engrais minéraux ont aussi leur importance : l'urée et les sels ammoniacaux sont préférables aux nitrates très sensibles à une lixiviation immédiate.

Les autres engrais minéraux

Dès que les balances cations-anions d'un engrais chimique sont équilibrées, il n'y a aucune raison pour qu'il y ait acidification du sol, au moins dans l'immédiat.

Combinaisons entre un acide fort et une base forte, le chlorure de potassium et le sulfate de potassium, sont, aux doses habituelles, pratiquement sans effet et sur le pH et sur l'entraînement des cations (MOULINIER, 1962 ; TINKER et SMILDE, 1963). Il en est de même pour le phosphate tricalcique, sel neutre qu'on a parfois voulu utiliser comme tampon calcique dans le sol ; ce fut recommandé en son temps dans le sud du Sénégal à des doses allant de 400 à 750 kg par hectare (CHARREAU et FAUCK, 1970).

Dans la même optique, kiésérite (SO_4Mg, H_2O) et gypse (SO_4Ca, $2\,H_2O$) seront légèrement acidifiants, les bases correspondantes $Mg(OH)_2$ et $Ca(OH)_2$ étant « faibles » par rapport à l'acide combiné H_2SO_4.

Pour compléter cette revue, ajoutons que le phosphate monocalcique (base des superphosphates) et le phosphate d'ammonium sont acidifiants du fait de l'apport important d'anions.

Dans tout cela, il s'agit d'un aspect un peu théorique, généralement exact pour les fumures d'entretien. En fait, il faut tenir compte des prélèvements par les cultures. Dans le cas du chlorure et du sulfate de potassium, les plantes absorberont le cation et laisseront l'anion, lequel se combinera avec une base présente dans le sol, en général le calcium ; et le sel formé risquera fort d'être lixivié. D'où les baisses de pH constatées parfois avec ces deux engrais, surtout s'ils sont apportés à forte dose. C'est ainsi que LAUDELOUT (1950) a observé une diminution de pH de 4,2 à 3,5 après application de 1 800 kg de K_2SO_4 dans les sols jaunes ferrallitiques fortement désaturés du centre du Zaïre.

On peut ajouter que l'anion SO_4^{--} étant très souvent utilisé (au moins partiellement) par la microflore, l'acidification sera un peu plus forte avec les chlorures, l'anion Cl^- devant être éliminé impérativement hors du sol.

Le contraire se produira avec le phosphate tricalcique. En fait, il n'y aura pas relèvement du pH mais une tendance à la stabilisation (effet tampon), là aussi à la suite d'apports importants en tonnage, certainement plus d'une tonne à l'hectare.

Dans la pratique, aux doses habituelles d'emploi de ces engrais, on ne verra guère d'effet immédiat et sur la réaction du sol et sur la lixiviation des bases — ou au contraire

leur augmentation (par le tricalcique) —, mais on devra prendre garde aux conséquences à long terme, en particulier dans le cas de cultures pérennes.

2.5. DISCUSSION

Sous un climat donné, avec une certaine pluviosité, la lixiviation du calcium et du magnésium peut être scindée en :

— un entraînement « fatal » en profondeur qui affecte la partie supérieure des sols sous végétation naturelle, dont l'intensité est plus ou moins fonction de la richesse du sol en bases naturelles ou induites par des amendements calco-magnésiens.

— un entraînement supplémentaire parfois très important sous culture qui dépend du taux de couverture du sol par les plantes cultivées, (à condition toutefois que la perméabilité ne soit pas affectée par les traitements culturaux).

— un entraînement à la suite d'apport d'engrais chimiques, surtout s'il s'agit de composés azotés.

S'il n'est pas possible d'agir sur le premier type d'entraînement, on peut essayer de réduire, autant que faire se peut, l'importance du second et du troisième.

C'est parce qu'il n'y a plus de racines pour capter au passage les bases entraînées en profondeur que le sol nu favorise au maximum la lixiviation. A l'opposé, les cultures pérennes, hévéa, palmier à huile, caféier, cacaoyer, bananier..., parce qu'elles couvrent bien le sol — au besoin avec l'aide d'une plante de couverture —, rétablissent en gros le climax forestier originel, caractérisé par une lixiviation « inéluctable » relativement faible.

Pour les cultures annuelles, le problème revient à laisser le sol nu ou partiellement couvert le moins longtemps possible dès le début des pluies, d'où l'intérêt des semis précoces, d'une pousse rapide des plantes, au besoin à l'aide d'une fumure (ne pas oublier non plus qu'une culture « ratée » revient à laisser des plages nues avec tous les inconvénients que cela comporte).

Quant au problème des engrais, il ne présente pas d'urgence à court terme pour les sels de potassium, du moins tant que les fumures restent modestes.

Il n'en est pas de même des dérivés de l'azote dont on a vu qu'ils provoquaient tous une lixiviation du calcium et du magnésium... sauf absorption totale — et improbable — par les racines.

Si l'on pouvait arriver à se passer d'engrais azotés, on devrait arriver à supprimer la quasi-totalité des pertes par lixiviation qui résultent des fumures purement chimiques. Le fumier de ferme et les amendements organiques du type gadoues pourraient être d'excellents substituts, mais leurs faibles disponibilités ou leurs prix élevés interdisent actuellement un large emploi.

Faute de mieux, il est recommandé de compenser les pertes prévisibles par des amendements calco-magnésiens (1,2 kg de calcaire broyé par kilogramme de sulfate d'ammoniaque par exemple). Ceci se heurte évidemment, en pratique, au manque de motivation et surtout aux disponibilités financières insuffisantes du paysan.

Une solution serait évidemment d'offrir sur le marché des engrais vraiment complets, c'est-à-dire contenant également calcium et magnésium.

Un essai fut tenté à Madagascar où l'on a fabriqué du nitrate d'ammoniaque en granulés enrobés de dolomie (CELTON, ROCHE et VELLY ; 1973), à raison de 150 kilogrammes de dolomie pour 200 kg d'azote. Malheureusement, le prix de revient de cet engrais est plus élevé que celui des constituants pris séparément.

3. DYNAMIQUE DE L'ALUMINIUM (L'ALUMINIUM ECHANGEABLE)

3.1. GENERALITES

Ainsi qu'on l'a vu au chapitre consacré à la nature des éléments chimiques dans le sol, l'aluminium existe sous différentes formes. Parmi celles-ci, l'une retiendra surtout l'attention, l'aluminium échangeable, en raison de ses implications agronomiques. Dès qu'il est présent en grande quantité sur le complexe absorbant des sols à réaction acide (pH $<$ 5,0), l'aluminium échangeable peut dans certains cas induire des toxicités redoutables, ne permettant plus comme spéculations agricoles que le pâturage extensif et la culture de certaines plantes tolérantes comme l'hévéa, le théier ou l'ananas. Manioc, riz, palmier à huile, canne à sucre, etc., pourtant relativement peu sensibles à l'aluminium, voient leurs rendements le plus souvent diminués, même parfois leur fructification compromise (BOYER, 1976).

Bien que les sols tempérés, podzols, sols bruns lessivés, puissent en contenir d'importantes quantités (JUSTE, 1964), l'importance de l'aluminium échangeable apparaît surtout dans les sols des régions intertropicales où il est fréquent d'observer des pH très bas. Les sols ferrallitiques ne font pas exception à la règle (BOYER, op. cit.).

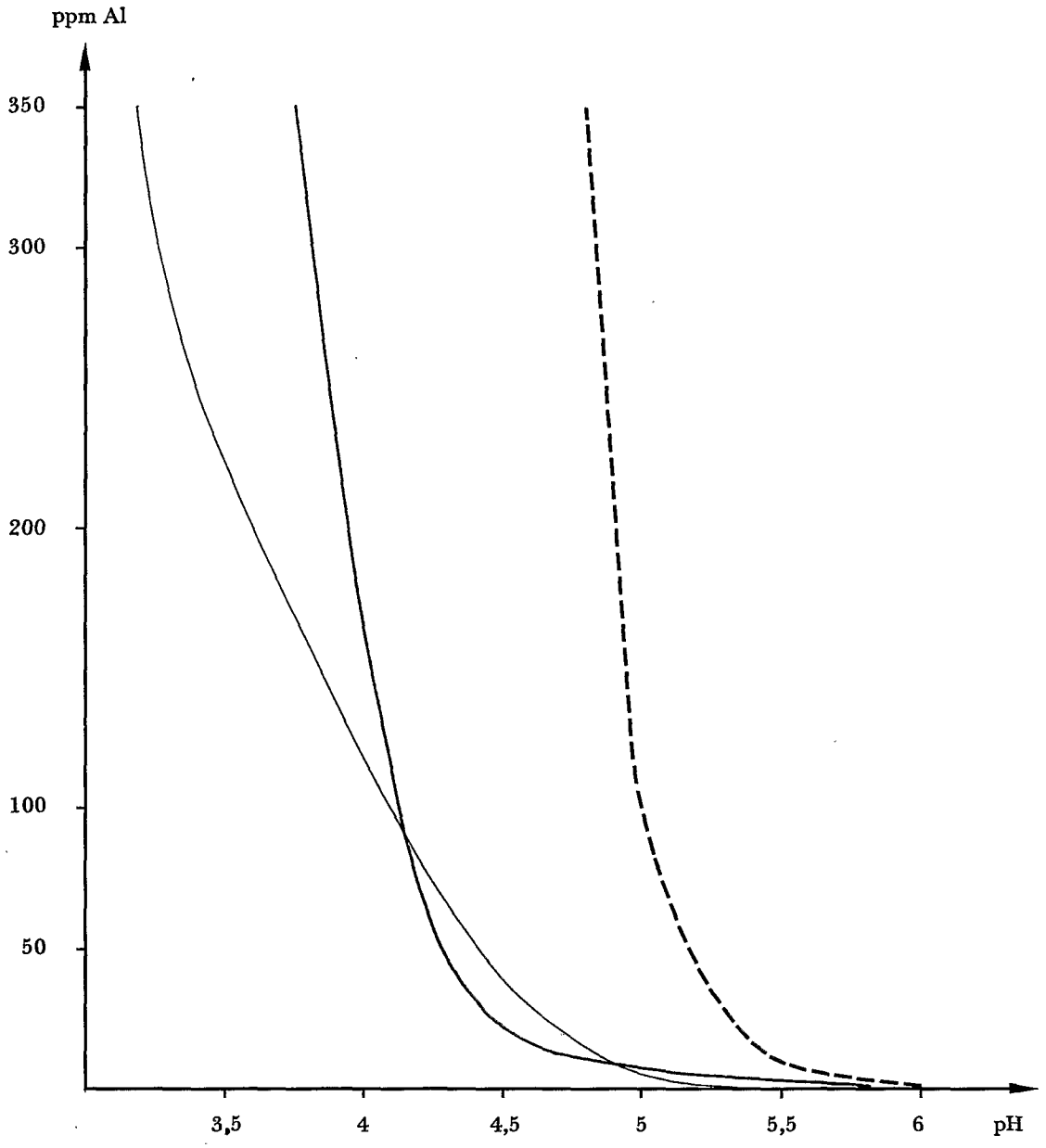
Il est symptomatique de lire dans les publications d'auteurs aussi éloignés géographiquement les uns des autres qu'OLMOS et CAMARGO (1976) au Brésil et TAM KAH CHENG (1976) en Malaisie, que la principale, sinon l'unique, amélioration à faire dans les sols très acides (pH $<$ 5,0 en général) est la neutralisation de l'aluminium échangeable.

3.2. FACTEURS D'APPARITION DE L'ALUMINIUM ECHANGEABLE

Tous les auteurs s'accordent à reconnaître que l'aluminium échangeable n'existe que dans les *sols acides et surtout fortement acides* (SEGALEN, 1973). Les pH H_2O pour lesquels il commence à apparaître en quantités dosables sont variables, non seulement suivant les types de sols, mais à l'intérieur d'une même classe de sols, comme les sols ferrallitiques (figure 19) : pH 6 pour un oxisol de Puerto Rico (ABRUNA-RODRIGUEZ et *al.*, 1970), pH 5,8 pour un sol ferrallitique fortement désaturé de Madagascar (VELLY, 1974), pH 5,3 pour un haplustox de Sierra Leone (BRAMS, 1971), ou entre 5,0 et 5,2 pour divers sols d'Afrique Noire et de Madagascar (GODEFROY et *al.*, 1976 ; TRINH, 1976-a). Mais il ne s'agit encore pour ces pH que de quantités très faibles, nullement gênantes, d'aluminium.

Par contre, dès que le pH descend au-dessous des valeurs précédemment citées, l'augmentation des teneurs en aluminium échangeable se fait de manière exponentielle, de telle sorte que c'est parfois au voisinage de pH 5, mais surtout aux pH inférieurs à 5, que les toxicités se développent et deviennent très vite intenses (IRAT, 1973). Il s'agit ici d'une « règle » qui souffre des exceptions : on signale en effet des toxicités alumiques à pH 5,5 dans les terres hautes du Viet Nam (CASTAGNOL, 1950) ainsi qu'en Ouganda (CHENERY, 1954).

Les pentes des courbes d'apparition de l'aluminium échangeable pour un pH donné étant assez variables d'une unité de sol à une autre (figure 19), il est impossible de dégager une relation générale entre pH et teneurs en aluminium échangeable du sol : par exemple, des ultisols de Puerto-Rico pourront présenter une nette toxicité aluminique à pH 5,0, tandis qu'un oxisol de la même île n'aura que des traces d'aluminium échangeable à pH 4,4 (ABRUNA-RODRIGUEZ et *al.*, 1970). Malgré cette variabilité, on doit *a priori* penser à



d'après VELLY (1974), Madagascar
d'après GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL(1976), Côte d'Ivoire
d'après CHENERY, Ouganda (cité par SEGALEN, 1973)

FIGURE 19

Aluminium échangeable du sol en fonction du pH dans trois sols ferrallitiques

une toxicité aluminique lorsque l'on constate de fortes diminutions de récoltes ou des accidents végétatifs dans les sols acides (pH voisins de 5 et surtout inférieurs à 5).

Bien que le pH soit le facteur essentiel de l'apparition de l'aluminium échangeable, la *teneur du sol en composés alumineux divers* joue évidemment un rôle : en l'absence d'une quantité notable de ceux-ci, comme dans les sols développés sur roches ultra-basiques, l'aluminium échangeable n'apparaîtra que faiblement. D'un autre coté, *les argiles de type smectite, illite, chorite et surtout vermiculite* (cette dernière, en milieu chaud et humide, est le plus souvent une vermiculite alumineuse) développent proportionnellement plus d'aluminium échangeable que la kaolinite pour un pH identique (PRATT et *al.*, 1969). Bien que présentes en proportions très inférieures à celles de la kaolinite, ces argiles peuvent exister en petites quantités dans les sols actuellement classés comme ferrallitiques, et donc y favoriser quelque peu la présence d'aluminium échangeable.

La matière organique peut complexer les ions aluminium et les rendre inactifs ; ces ions, fortement retenus, passent avec une certaine difficulté dans la solution du sol, au moins tant qu'ils ne saturent pas à plus de 60 % le complexe d'échange des horizons humifères (EVANS et KAMPRATH, 1970). Corroborant ceci, DUCHAUFOUR et SOUCHIER (1980) trouvent qu'en France, à pH égal, le rapport Al/T est nettement plus faible pour les sols contenant de la matière organique que pour les sols minéraux.

Les courbes (figure 20) obtenues en Côte d'Ivoire par GODEFROY et *al.* (1978) montrent qu'entre pH 4,3 et 5,0, un horizon riche en matière organique développe 20 à 30 milliéquivalents d'aluminium échangeable de moins qu'un horizon argileux. Bien qu'établies dans deux horizons d'un sol hydromorphe organique en surface (dit tourbeux), elles illustrent bien le « coefficient retard » que, lors de l'acidification d'un sol, la matière organique inflige à l'apparition de l'aluminium échangeable. Il n'y a aucune raison pour que les sols ferrallitiques fassent exception à une règle aussi générale.

Une *solution du sol chargée en sels minéraux* favorisera la libération de l'aluminium dans la solution du sol par réaction d'échange (KAMPRATH, 1972) ; cette éventualité a peu de chances de se produire en milieu naturel, les sols à aluminium échangeable étant, normalement, fortement désaturés en bases, mais elle peut avoir des conséquences néfastes après une fumure minérale (YUAN, 1960 ; KAMPRATH, op. cit.). Il en est souvent de même après des *fumures uniquement azotées*, mais, ici, c'est la baisse de pH consécutive à l'apport de cet engrais qui est le facteur le plus à incriminer.

3.3. L'ALUMINIUM ECHANGEABLE ET LES PROPRIETES DU SOL

Le complexe absorbant du sol voit ses propriétés quelque peu modifiées par la présence d'aluminium échangeable. Lorsque celui-ci se fixe sur les sites d'échange, il les bloque, et on en arrive à la neutralisation à peu près totale par l'aluminium des charges négatives. En fait, c'est souvent entre pH 4,5 et pH 4,0 que le sol devient électriquement neutre, alors que les charges variables (elles aussi neutralisées tant qu'elles existent) deviennent pratiquement nulles (UEHARA et KENG, 1975).

Aussi, dès qu'on déplace et hydrolyse, en hydrate $Al(OH)_3$, l'aluminium échangeable par un apport de cations (calcium, surtout), la *capacité d'échange* se met à croître par libération des sites des charges permanentes et augmentation avec le pH des charges variables. Ce phénomène, déjà perçu par LAUDELOUT (1950) dans les sols ferrallitiques jaunes fortement désaturés de Yangambi (Zaïre), est relaté par de nombreux auteurs (SEGALEN, 1973 ; UEHARA et KING, 1975). Ce passage de l'aluminium échangeable dans la solution du sol représente une source d'acidité potentielle considérable par libération d'ions H^+ : d'où un « *effet tampon acide* ».

S'il y a tendance à la baisse de pH, l'hydroxyde $Al(OH)_3$, et vraisemblablement aussi les hydroxydes intermédiaires $Al(OH)_2^+$ et $Al(OH)^{++}$ (TRINH, 1975-b), absorbent les ions

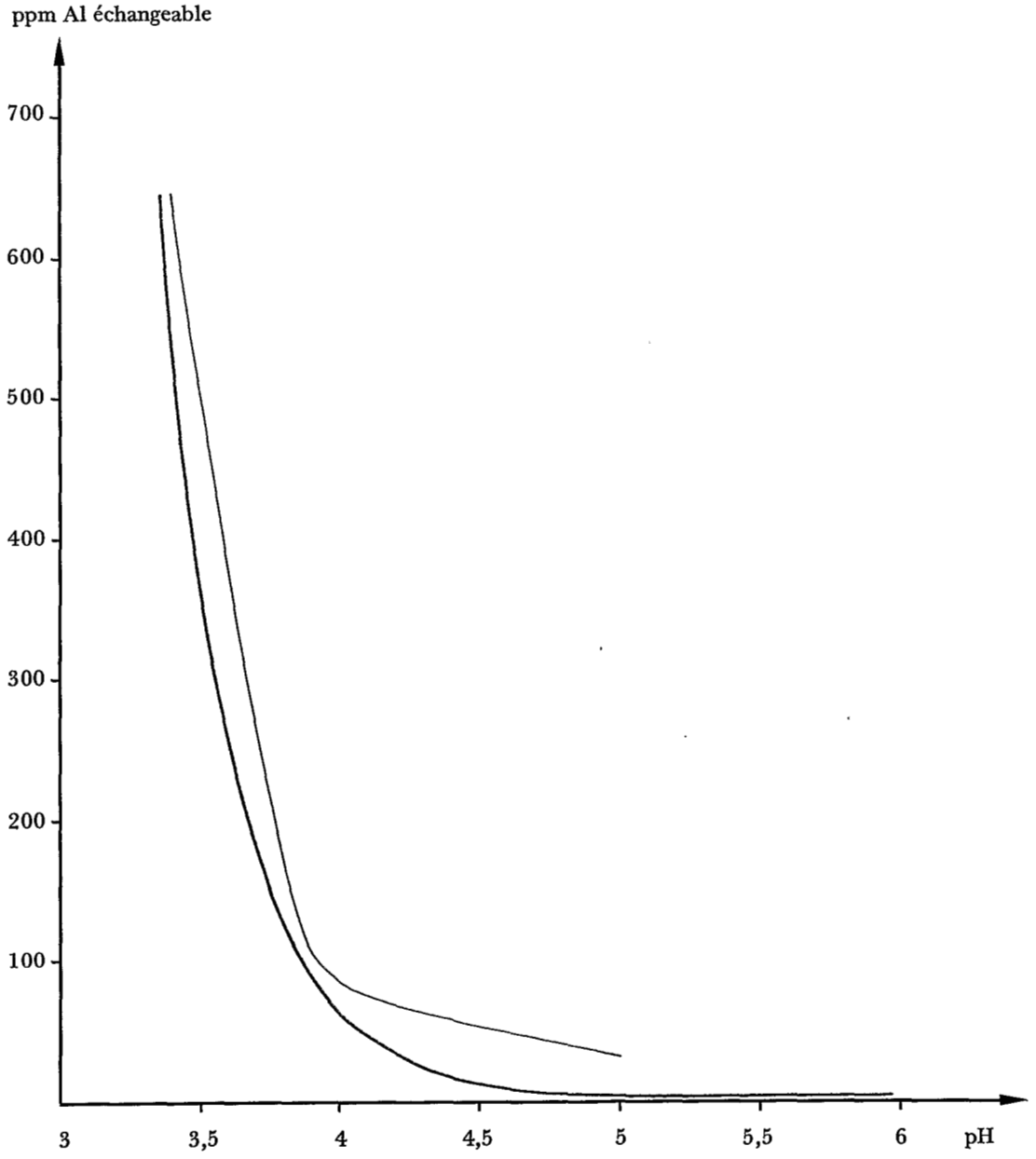


FIGURE 20

Influence de la matière organique sur l'apparition de l'aluminium échangeable en fonction du pH dans un sol hydromorphe organique d'après GODEFROY, LASSOUDIERE, LOSSOIS, PENEL *(1978)*

H^+ pour donner de l'aluminium échangeable ; celui-ci alors neutralise les sites d'échange : d'où une résistance à l'acidification par « *effet tampon alcalin* » :

$$Al^{+++} + 3\ H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3 + 3\ H^+$$

La présence d'hydroxydes amorphes dans les sols (la gibbsite cristallisée semble peu intervenir en raison de sa faible solubilité) engendre donc un *double tampon acide et alcalin* qui s'oppose à toute variation du pH. Ce tampon a son maximum d'efficacité vers pH 4,5 dans les sols d'Afrique et de Madagascar étudiés par TRINH (op. cit.).

Ceci permet d'expliquer pourquoi, à peu de choses près, un pH voisin de 4,5 caractérise l'acidité couramment développée par beaucoup de sols ferrallitiques et pourquoi, lors de l'apport d'amendements calcaires, il faudra des tonnages considérables pour simplement briser le tampon acide avant de voir la réaction du sol s'élever.

L'aluminium échangeable, lorsqu'il se fixe sur le complexe absorbant, chasse le *potassium* des sites d'échange, tout au moins de ceux pour lesquels ce dernier élément n'a pas une spécificité absolue, et s'oppose à toute fixation ultérieure (DUTHION, 1968 ; MOHINDER SING, 1970 ; BOYER, 1973). Par contre, l'aluminium est aisément déplacé par le calcium et, en général, par les cations alcalino-terreux.

Il est probable que la présence d'aluminium échangeable favorise la rétention des *sulfates* par le sol ; les travaux de MEHLICH (1964) montrent que, sur un sol préalablement aluminisé, la fixation de cet anion croît régulièrement de pH 7 à pH 4,5 et qu'une stabilisation se produit ensuite jusqu'à pH 4,2 (cf. Dynamique du soufre, p. 177). Toutefois, des agronomes ayant travaillé en milieu ferrallitique doutent de l'intérêt pratique de ce phénomène, sinon pour la rétention du sulfate, du moins pour celle du potassium associé à ce sulfate (BOLTON, com. pers.).

Une autre modification des propriétés du sol par l'aluminium échangeable consiste en son comportement à l'égard du *phosphore*. Ces deux éléments se combinent ensemble pour donner des phosphates d'alumine, qui, en quelque sorte, soutirent l'aluminium échangeable ; d'où une réduction des toxicités aluminiques surtout manifeste lors des apports d'engrais phosphatés (KAMPRATH, 1972 ; SEGALEN, 1973 ; BOYER, 1976).

3.4. LA BARRIERE CHIMIQUE

Lorsqu'on cultive un sol affecté par l'aluminium échangeable, il n'est pas rare de voir la plante se développer à peu près normalement dans l'horizon supérieur (grâce à la complexation de l'aluminium par la matière organique), mais se trouver dans l'impossibilité d'enfoncer ses racines en profondeur, avec tous les inconvénients que cela représente, en particulier une réserve d'eau utile insuffisante pour parer aux irrégularités des pluies (SOARES et *al.*, 1975). C'est le « goulot d'étranglement chimique » (VAN WAMBEKE, 1971) ou la « barrière chimique » (auteurs américains et brésiliens).

Cet effet de « barrière » pour les racines est dû en particulier à la diminution avec la profondeur des teneurs en matières organiques surtout, mais aussi du phosphore et des bases échangeables, dont la présence peut atténuer de manière sensible les toxicités aluminiques. Et cet aluminium toxique situé sous la couche arable humifère subsiste même lorsqu'un chaulage superficiel a débarrassé la partie supérieure du sol de son aluminium échangeable.

Curieusement, le calcaire des amendements mis en surface et entraîné par les eaux de drainage ne paraît avoir que très peu d'action sur l'aluminium des horizons sous-jacents. GARGANTINI (1972) indique que, dans divers sols cultivés de l'Etat de São Paulo au Brésil amendés avec 10 tonnes de dolomie par hectare, le calcium et le magnésium n'avaient pénétré en moyenne que sur 40 centimètres de profondeur au bout de 5 ans.

On a avancé divers arguments pour expliquer ce phénomène de barrière chimique : l'un des plus plausibles, sinon le plus convaincant, fait intervenir le fait que le complexe absorbant de ces horizons profonds se trouve au voisinage ou au-dessous du point iso-électrique (le « zéro point of charge » des anglo-saxons) ; il est donc électriquement neutre ou faiblement chargé positivement, et les eaux de drainage passent sans abandonner, ou fort peu, leurs bases (UEHARA et KENG, 1975).

Ce n'est qu'à la longue, et progressivement, que l'on peut s'attendre à une neutralisation de l'aluminium de proche en proche à partir de la surface, comme dans l'expérience relatée par GARGANTINI (1972).

Un tel délai est évidemment incompatible avec une rentabilité, même moyenne, de l'opération coûteuse qu'est un apport d'amendements calciques ou calco-magnésiens. Aussi, faute de mieux, préconise-t-on dans le Campo Cerrado bérsilien d'enfouir d'abord la moitié de la dose d'amendement par un labour profond de 30 centimètres, puis la seconde moitié par un labour superficiel à 15 centimètres (SOARES et *al.*, 1975 ; GONZALES et *al.*, 1976). On double ainsi la profondeur de la tranche de sol susceptible d'être immédiatement explorée par les racines par rapport aux opérations classiques qui n'intéressent généralement que les quinze centimètres superficiels. Lorsqu'il s'agit de plantes pérennes, on préfère souvent creuser des trous de plantations un peu plus importants et profonds qu'à l'accoutumée et les remplir de terre mélangée à l'amendement. Sinon, on en est réduit à forer latéralement à la plante des trous de tarière pour introduire calcaire et dolomie en profondeur, en espérant qu'ils diffuseront dans l'aire de répartition des racines.

La barrière chimique est la source de très grandes difficultés pour la mise en valeur des sols chargés en aluminium échangeable. C'est un problème pris très au sérieux en Amérique du Sud, en particulier au Brésil (SILVA, 1976 ; OLMOS et CAMARGO, 1976). Il est probable qu'avec le progrès des connaissances, son importance se fera jour aussi en d'autres régions comme l'Afrique Centrale et l'Extrême Orient.

3.5. DISCUSSION : CONSEQUENCE DE LA PRESENCE DE L'ALUMINIUM ECHANGEABLE

Bien que la présence de l'aluminium échangeable ait été démontrée depuis le début du siècle (VEITCH, 1904), bien que les agronomes américains l'aient étudié entre les deux guerres mondiales et aient poussé leurs investigations après la seconde, les étendant au domaine tropical (Amérique Latine surtout), ce n'est qu'assez récemment que l'on a pris totalement conscience de son importance. Il n'était pas rare, au début des années 1970, de rechercher la cause d'une « barrière chimique » dans des carences du sol en calcium ou en phosphore, alors que, de toute évidence, c'est l'aluminium qui était en cause.

Beaucoup de sols ferrallitiques ont normalement de l'aluminium échangeable à doses toxiques pour les plantes cultivées (sols de pH égaux ou inférieurs à 5,0). Mais il est un autre aspect de ce problèmes qui apparaît tout aussi redoutable, et celui-ci est lié à la dynamique d'apparition de l'aluminium échangeable. Une baisse de pH lors de cultures successives, lorsque la réaction du sol descend à pH 5,0 et surtout au-dessous, induit le plus souvent des toxicités aluminiques, parfois aggravée par des toxicités manganiques (synergie Al-Mn, cf. chap. XI, p. 264) si le sol contient des quantités notables de manganèse.

L'échec retentissant des essais de culture mécanisée d'arachide au Niari (Congo) provient indirectement de la baisse du pH, à vrai dire initialement faible (autour de 5,0-5,2) jusqu'à des valeurs de 4,8-4,5 ; la cause directe en est le développement d'aluminium échangeable dans les sols ainsi acidifiés, ainsi que la toxicité manganique qui lui est associée. Beaucoup de zones, autrefois cultivées en canne à sucre dans l'Etat de Bahia, sont actuellement abandonnées au pâturage extensif en raison de l'acidification excessive des sols et de la présence d'aluminium échangeable ; et il s'agit bien souvent de sols ferrallitiques.

Les toxicités aluminiques représentent donc une éventualité toujours à craindre dès que l'on s'efforce d'intensifier les cultures. Il est vraisemblable qu'elle se produira de plus en plus fréquemment en raison justement des « progrès » de l'agriculture des tropiques.

Fort heureusement, on sait maintenant reconnaître l'aluminium échangeable dans les sols et le combattre, en particulier par l'apport d'amendements calciques et calco-magnésiens.

4. DYNAMIQUE DES OLIGO-ÉLÉMENTS MOLYBDÈNE, BORE, MANGANÈSE, CUIVRE, ZINC, CHLORE

4.1. INTRODUCTION

Le terme d'oligo-éléments appelés aussi éléments-traces est pris ici dans l'acception généralement admise de corps simples chimiques, présents dans les sols en quantité minime (de l'ordre de 1 à 2 000 ppm) et absorbés par les plantes en quantités 10^{-3} à 10^{-6} fois moindres que les éléments majeurs (C, O, H, N, P, K, S). Cette définition conduit à éliminer de cette catégorie, en plus des éléments majeurs, d'autres comme le fer, l'aluminium et la silice qui, pour la plante, se comportent comme des oligo-éléments tout en existant en abondance dans les sols.

Parmi les oligo-éléments, on se bornera à étudier les cas du Molybdène, du Bore, du Manganèse, du Cuivre et du Zinc, les plus souvent cités en raison des soucis qu'ils causent aux agronomes et, de ce fait, les mieux connus (1). On y ajoutera le chlore dont l'importance s'est fait jour sous les tropiques depuis une dizaine d'années.

Si l'on envisage de façon globale les sols ferrallitiques, leurs teneurs en ces oligo-éléments sont rarement trop élevées pour produire d'emblée des toxicités. Il en est de même pour les carences et déficiences : les besoins des plantes sont habituellement si faibles que les sols devraient être normalement capables de les couvrir. Bien sûr, il existe des exceptions. Plus que les déficits ou les excès en valeurs absolues, c'est la dynamique particulière de chacun des oligo-éléments qui peut faire varier dans des proportions considérables leur assimilabilité.

Et ce sont les facteurs de cette assimilabilité qui feront l'objet principal de cette étude. De ce fait, on envisagera successivement les répercussions du pH, le rôle de la matière organique, la fixation par les colloïdes minéraux, ainsi que d'autres phénomènes que l'on pourrait qualifier de secondaires comme la lixiviation, l'érosion, le chaulage et les apports d'engrais chimiques.

La dynamique de l'assimilabilité des oligo-éléments a d'autant plus d'importance que, bien souvent, entre seuil de carence et seuil de toxicité, il y a un intervalle incomparablement plus réduit que pour les éléments majeurs.

---

(1) Les rôles respectifs en tant qu'oligo-éléments du cobalt, chrome, nickel, plomb, cadmium, arsenic, titane, etc. restent encore assez mal connus en milieu tropical. Leur importance apparaît quantitativement, jusqu'à présent, moindre que celle du manganèse, du cuivre, du zinc, du molybdène et du bore. Signalons toutefois que le cadmium fait l'objet de recherches intenses sur le plan mondial dans le cadre de la protection de l'environnement, tandis que cobalt, chrome et nickel sont activement étudiés en Nouvelle Calédonie. On peut donc espérer avoir rapidement des connaissances plus complètes au moins sur ces quatre corps.

4.2. ROLE DU pH

pH et assimilabilité des oligo-éléments

SULLIVAN (1972) a synthétisé sur un graphique (figure 21) les effets du pH sur l'assimilabilité des oligo-éléments les plus courants, Bore, Cuivre, Zinc, Manganèse, Fer et Molybdène.

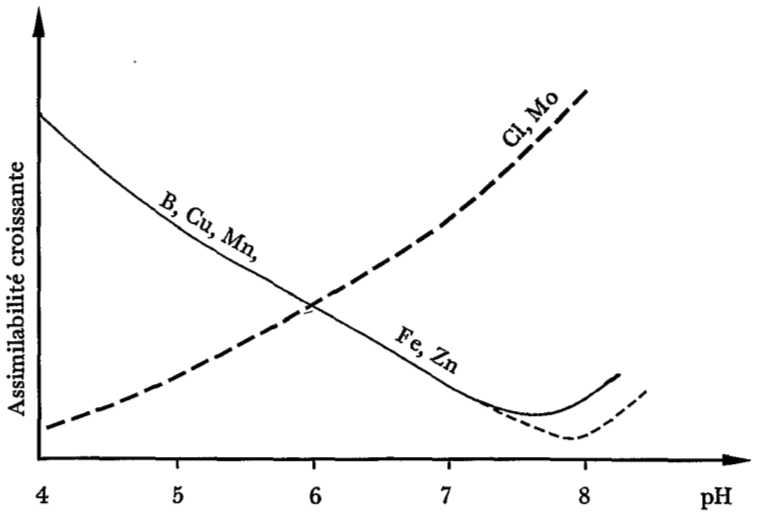


FIGURE 21

Assimilabilité des oligo-éléments en fonction du pH du sol d'après SULLIVAN (1972)

Le Molybdène

Le molybdène voit son assimilabilité croître au fur et à mesure que le pH s'élève. Le molybdène étant en grande partie fixé sur l'argile, il se produit une libération de l'ion molybdique sous l'influence des anions OH^- (STOUT et *al.*, 1951).

$$\text{Argile } MoO_4^{--} + 2\ OH^- \rightarrow \text{Argile } OH + MoO_4^{--}$$

Lors des carences en molybdène, apport de Mo sous forme d'engrais et chaulage — induisant un relèvement du pH — donnent les mêmes résultats pratiques (FAUCK, 1956 en Casamance ; FORSTER, 1970 en Ouganda). Inversement, si le sol est par trop acide, il y a insolubilisation du molybdène apporté, donc efficacité moindre de l'engrais molybdique ; il faut alors combiner engrais et relèvement du pH par la chaux ou la dolomie (BHANGOO et SHARON, 1962, au Belize).

Le Manganèse

Toute variation du pH provoque des modifications considérables dans l'assimilabilité du manganèse. FRANQUIN (1958) a mesuré en fonction du pH le manganèse échangeable des sols fortement désaturés argileux de la vallée du Niari au Congo. Entre pH 5,2 et 4,3, ce manganèse passe de 6,3 ppm à 106 ppm (tableau X.5.). Si on pratique l'extraction

à l'eau carbonatée qui, en principe, reproduit l'action des racines, on n'obtient pratiquement rien dès que le pH dépasse 5,3.

TABLEAU X.5. — *pH du sol et manganèse échangeable extrait par un mélange acide acétique - acétate de NH_4 tamponné au pH du sol d'après* FRANQUIN *(1958)*

pH du sol	Mn échangeable
5,2	6,3 ppm
5,0	13,0 ppm
4,9	17,0 ppm
4,8	18,6 ppm
4,7	32,0 ppm
4,3	106,0 ppm

D'une façon plus générale, on peut dire que l'élévation du pH provoque le déplacement vers la droite de l'équilibre suivant (CHENG et OUELETTE, 1971 ; SULLIVAN, 1972 ; ZAJIC, 1969).

$$MnO \rightleftharpoons Mn_2O_3 \rightleftharpoons MnO_2$$

Il y a donc passage progressif du manganèse bivalent (forte assimilabilité) au manganèse trivalent puis tétravalent (très faible assimilabilité). Afin de fixer les idées, on peut dire que MnO_2 est la forme la plus stable aux pH alcalins, que Mn_2O_3 (1) domine à la neutralité et aux pH légèrement acides et que le manganèse bivalent (oxyde ou hydroxyde) est sinon totalement prédominant, du moins très abondant en milieu fortement acide, pH $\leqslant$ 5,5 (LINSDAY, 1972). Seul le manganèse bivalent est assez mobile pour se fixer sur le complexe absorbant et passer ensuite dans la solution du sol ; c'est aussi la seule forme que les plantes puissent absorber avec facilité.

Suivant les teneurs du sol en manganèse total, l'élévation progressive du pH pourra, en réduisant le taux du manganèse assimilable, réduire, puis éliminer les toxicités manganiques et, à l'extrême, faire apparaître déficiences et carences.

Contrairement à la plupart des autres oligo-éléments, ce sont les accidents dûs à un excès de manganèse (bivalent) qui préoccupent les agronomes œuvrant en milieu tropical, beaucoup plus que les carences et déficiences. Aussi pourrait-il être tentant de rechercher le pH minimal compatible avec une nutrition manganique correcte des plantes cultivées, soit une sorte de « pH-seuil de toxicité pour Mn ».

La variabilité des résultats obtenus est déconcertante selon les sols et les types de cultures : pH 4,5 et pH 5,2 respectivement pour l'arachide et le cotonnier dans la vallée du Niari au Congo (FRANQUIN et MARTIN, 1962) ; pH 4,5 à 5,0 pour le cotonnier encore sur divers sols de Côte d'Ivoire (BOUCHY, 1970) et de Madagascar (NGO CHANG-BANG et *al.*, 1971) ; pH 5,0 pour le tabac dans les oxisols de Puerto Rico (ABRUNA-RODRIGUEZ et *al.*, 1970) ; pH 5,5 pour le maïs à Madagascar (ROCHE, CELTON et VELLY, 1973) etc. et même pH 5,6 pour le théier sur certains sols d'Ouganda (CHENERY, 1954), ce qui paraît un comble pour une plante aussi typiquement acidophile.

Cette disparité de valeurs de pH s'explique par le fait que la teneur d'un sol en manganèse assimilable dépend des taux de manganèse total, tout autant que du pH.

Aussi préfère-t-on rechercher un pH de « sécurité ». Suivant en cela les conseils de FOY (1974), la plupart des agronomes, œuvrant sous les tropiques, pensent que pour des pH égaux ou supérieurs à 5,5, les risques de toxicité manganique sont minimes (IRAT, 1973), sauf hydromorphie accidentelle ou permanente.

(1) Mn_2O_3 se dissocie facilement en MnO et MnO_2.

SHORROCKS (1964) est plus exigeant pour les latosols de Malaisie formés sur basalte : bien que les toxicités manganiques y apparaissent surtout à pH $\leqslant$ 5,0 pour le cacaoyer et ses légumineuses de couverture, cet auteur a tendance à considérer qu'un pH de 6,5 est souhaitable pour affirmer que tout danger est écarté pour ces plantes. Il s'agit là des sols les plus riches en manganèse de la péninsule malaise et d'une plante particulièrement sensible, le cacaoyer, ce qui conduit à penser que SHORROCKS (op. cit.) fait montre d'une grande prudence, sans doute même excessive pour d'autres sols et d'autres cultures.

Les carences et déficiences manganiques sont relativement rares en sols ferrallitiques, étant donné que l'assimilabilité de cet élément est toujours bonne à pH acide : ainsi l'alimentation en manganèse de théiers à Ceylan se révèle parfaitement normale sur des sols ne contenant que 15 ppm de Mn total et 10 ppm de Mn assimilable, mais à pH voisin de 4,5 (KALPAGE, 1967). Une telle éventualité, carence en Mn, n'est cependant pas totalement à exclure, car elle se produit parfois sur les caféiers poussant dans les « Terras Roxas legitimas », sols à réaction acide (pH 5,5 à 6), mais pauvres en manganèse échangeable, de l'État de São Paulo au Brésil (MALAVOLTA, 1967).

Il n'en reste pas moins que ce genre d'accident est surtout fréquent en sols alcalins, sols tout à fait exceptionnels dans la classe des ferrallitiques.

Le Cuivre et le Zinc

On considère souvent que ces deux métaux se comportent en solution comme des hydroxydes amphotères, c'est-à-dire qu'ils se comportent comme des bases faibles ou des acides faibles selon le pH du milieu (SULLIVAN, 1972).

Dans le cas du Zinc, cet élément se trouverait en milieu acide sous forme très soluble $HZnO_2^-$ et en milieu plus neutre (pH 6,0) sous forme de ZnO_2. Cet oxyde se combine facilement avec le phosphore (phosphate de Zn insoluble), avec le sodium, formant alors un zincate de Na peu soluble en milieu acide, mais dont la solubilité s'accroît à partir de pH 6,5, et avec le calcium pour donner un zincate de calcium très peu soluble, tout au moins jusqu'à pH 8 et, comme précédemment, sa solubilité s'accroît ensuite (FISKELL et *al.*, 1967 ; THORNE, 1957) ; de telle sorte que la fréquence maximale des carences en Zn se situe entre pH 6,0 et pH 8,0.

Contrairement au Zinc, le Cuivre présente une dynamique simple en fonction de la réaction du milieu : son assimilabilité décroît constamment si le pH augmente.

En plus des variations dans la nature des composés minéraux sous l'influence du pH, on a tendance actuellement à mettre en avant la vitesse de diffusion à partir des supports colloïdaux (elle-même très dépendante du pH), comme on le verra au paragraphe 4.4. (p. 229 sq.) consacré au rôle des colloïdes minéraux dans la dynamique des oligo-éléments.

Le Bore

L'assimilabilité du Bore varie très sensiblement avec le pH. Lorsqu'on relève le pH d'un sol très acide, le bore extractible à l'eau chaude diminue constamment jusque vers pH 7,5-8,0 pour lesquels l'assimilabilité apparaît minimale ; au-delà, elle croît à nouveau (BISHOP et COOK, 1958 ; ORAM, 1961). Ce minimum semble lié à la formation en milieu neutre d'un borate fort peu soluble, mais dont la solubilité croît si le pH dépasse 8.

La nature du cation, facteur du relèvement du pH, semble de peu d'importance car le phénomène se produit de la même façon avec Ca, Mg et Na : seule compte la modification du pH (OLSON et BERGER, 1946).

4.3. COMPLEXATION PAR LA MATIERE ORGANIQUE

La matière organique du sol, outre la fixation d'ions par ses valences libres comme chez tous les colloïdes, possède une propriété d'une extrême importance pour les oligo-éléments, la complexation. Cette complexation est analogue dans son principe à une chélatation naturelle.

La complexation, qui intéresse à divers degrés tous les oligo-éléments, les rend inassimilables pour les plantes ; elle peut, soit faire régresser les toxicités, soit faire apparaître des carences suivant que le sol est riche ou pauvre en éléments mineurs. En contrepartie, la matière organique forme une réserve très importante d'oligo-éléments qui est libérée progressivement lors de sa minéralisation.

Cas du molybdène et du bore

L'importance pratique de la matière organique semble relativement la plus faible dans la dynamique du *molybdène*, peut-être parce que cet élément se fixe pour une bonne part sur les argiles sous forme anionique. Elle est controversée dans le cas du *bore* : OLSON et BERGER (1946) la font intervenir en second rang, bien que très loin après le pH, là aussi sans doute parce l'anion borate se fixe en grande partie sur les colloïdes minéraux. Pourtant, on a signalé au Brésil (MALAVOLTA, 1967) et surtout en Afrique orientale (PROCTER, 1965 ; SMITH, 1960) des carences aiguës en bore dans des reboisements forestiers pendant la saison sèche, carences qui s'atténuaient considérablement dès le retour des pluies. On en a déduit que cette meilleure alimentation boratée provenait de la reprise de la minéralisation de la matière organique. Il est vrai que certains auteurs (DECAU, 1965) interprètent les carences par une moins bonne solubilité du bore dans la solution du sol, lorsque celle-ci se concentre au cours de longues périodes sans pluie. Il n'en reste pas moins que les carences en bore sont surtout fréquentes et aiguës en saison sèche.

Cas du manganèse

La matière organique complexe vigoureusement le manganèse assimilable, le rendant ainsi inaccessible aux plantes. Un seul chiffre donnera une idée de l'intensité de la fixation du manganèse sur la matière organique : 93 % du manganèse de la solution du sol se trouve sous forme organique si l'on en croit les résultats obtenus par ELLIS et KNESEK (1972).

Ainsi, des carences en manganèse dans les sols à caféiers du Kivu — sols à réaction quasi-neutre — sont d'autant plus intenses que la teneur en matière organique est plus élevée (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958). Certains planteurs ont voulu corriger par un paillage un mauvais état végétatif dont ils ignoraient la cause, et, naturellement, les carences en manganèse se sont aggravées (VAN WAMBEKE, com. pers.).

Des carences, cette fois expérimentales, furent provoquées sur cacaoyers au Ghana, mais elles se produisirent uniquement en sols à pH élevé (PH $>$ 7) et à forte teneur en matière organique (CUNNINGHAM, 1964). On a aussi signalé une légère déficience manganique (décelée par analyse foliaire) sur palmier à huile poussant sur les sols ferrallitiques très désaturés et bien pourvus en humus sur sables tertiaires de basse Côte d'Ivoire (OLLAGNIER, OCHS et MARTIN, 1970), déficience aisément contrôlée par de légers apports de sulfate de manganèse.

En fait, les déficiences — et à plus forte raison les carences — en manganèse sont rares dans les sols ferrallitiques qui combinent rarement pH neutre, taux organiques très élevés, et très faibles teneurs en manganèse total.

Il est par contre fréquent d'observer des toxicités redoutables dans les sols cultivés, toxicités imputables au moins partiellement à la chute des teneurs en humus. La baisse de pH, conséquence très fréquente de la culture, provoque en premier lieu une augmentation

du manganèse assimilable auquel vient s'ajouter le manganèse complexé libéré par la minéralisation de la matière organique. Aussi constate-t-on un accroissement des accidents par excès de manganèse assimilable au fur et à mesure que le temps de culture s'allonge (CHENERY, 1954 ; MARTIN G., 1967 ; NGO CHANG BANG *et al.*, 1971, etc.).

Inversement, on put corriger temporairement la toxicité manganique des sols argileux de la vallée du Niari par apport de fumier de ferme afin de favoriser une complexation du manganèse assimilable excédentaire (MARTIN G., op. cit.). L'importance des tonnages nécessaires (40 T/ha) rendit irréalisable à grande échelle cette opération. De ce fait, le chaulage s'est avéré d'emploi plus facile.

Le cuivre et le zinc

Tout comme le manganèse, le cuivre et le zinc subissent une forte complexation de la part de la matière organique qui les rend inassimilables par les plantes (SULLIVAN, 1972).

Aussi observe-t-on une fréquence maximale des *accidents de carence* dans les sols dits tourbeux qui sont le plus souvent des sols hydromorphes organiques. Les sols ferrallitiques d'altitude, généralement bien pourvus en humus, présentent assez souvent ce type de carence : par exemple, pour le cuivre sur caféier Arabica au Kenya et en Ouganda, pour le zinc sur citrus en Ouganda (CHENERY, 1954), etc.

Lorsque les déficiences ont pour cause unique un excès de matière organique, les corrections par application de cuivre et de zinc au sol se révèlent généralement inefficaces, sauf apport par chélate artificiel (OSINAME *et al.*, 1973). On préfère habituellement les pulvérisations sur le feuillage.

Les *toxicités*, qui sont plus le fait du cuivre que du zinc, ne sont guère observées que sur les sols surmontant les gisements de cuivre et plus fréquemment aux abords des usines de traitement, ou encore à la suite de nombreux traitements fongicides par des bouillies cupriques. La littérature agronomique ne mentionne que fort peu de cas de ce genre, même au Zaïre et en Zambie où, pourtant, ces toxicités doivent exister aux abords des mines ; l'expérience des pays tempérés montre qu'un apport de matière organique permet de corriger ces accidents (1).

4.4. RETENTION ET LIBERATION PAR LES COLLOIDES MINERAUX

La matière organique n'est pas seule à fixer les éléments mineurs dans le sol. Les colloïdes minéraux, hydroxydes d'aluminium et de fer, ainsi que les argiles, jouent un rôle important, bien que quantitativement modeste. Si l'on s'en tient à des considérations de charges électriques, les hydroxydes devraient adsorber surtout bore et molybdène qui se présentent habituellement sous forme anionique, tandis que les argiles auraient cette fonction pour les cations Mn, Cu et Zn. En fait, le problème semble plus complexe que ce schéma un peu simpliste ; en outre, il apparaît souvent insuffisamment connu.

Le molybdène

Sous forme anionique MoO_4^{--}, il a la propriété de pénétrer dans les cavités hexagonales situées à la surface des structures cristallines de l'argile, en particulier de l'halloysite ; dans

(1) Du fumier de ferme a permis, dans le sud de la France, de « guérir » des glaïeuls poussant sur un sol enrichi en cuivre pendant une centaine d'années par de fréquentes pulvérisations de « bouillie » faites sur le vignoble, précédent cultural de cette culture florale (DROUINEAU et MAZOYER, 1962).

cette position, il s'échange assez facilement avec le milieu extérieur, et ceci d'autant mieux que le pH est plus alcalin (STOUT et *al.*, 1951).

$$\text{Argile } MoO_4^{--} + 2\ OH \rightarrow \text{Argile } OH + MoO_4^{--}$$

En position d'échange sur l'argile, l'ion molybdate se trouvera en compétition avec d'autres ions similaires ; c'est ainsi que l'ion PO_4^{---} peut favoriser l'assimilabilité du molybdène du sol en l'expulsant des sites d'échange.

Le bore

Au laboratoire, cet élément se fixe avec facilité et énergie sur les hydroxydes d'aluminium dans une proportion beaucoup plus importante que sur les hydroxydes de fer (SIMS et BINGHAM, 1968). Ceci peut expliquer qu'il soit fortement adsorbé dans les sols acides après qu'un chaulage ait libéré l'aluminium échangeable sous forme d'hydroxydes $Al(OH)_3$. La réaction est d'autant plus intense que la surface spécifique de l'hydroxyde est plus importante (HATCHER et *al.*, 1967), d'où une supériorité des formes colloïdales sur les formes cristallines (gibbsite).

Le bore peut se fixer également sur les argiles, mais il apparaît que cette fixation dépend pour une grande part de la nature des revêtements : ainsi une kaolinite enrobée d'hydroxyde d'aluminium fixera nettement plus de bore que la kaolinite sans revêtement et surtout que la kaolinite avec un revêtement ferrugineux (SIMS et BINGHAM, op. cit.). Il s'agit ici d'expériences de laboratoire faites à pH constant (pH = 6), qu'il serait dangereux de transposer telles quelles dans ce milieu si complexe qu'est le sol ; mais il est probable que le sens du phénomène reste le même.

Si l'argile comportant des revêtements alumineux joue un rôle notable dans l'alimentation en bore des plantes, il semble douteux qu'elle contienne des réserves importantes en bore total. Des analyses faites en France sur des sols bruns lessivés issus de granites et de schistes ont montré que la fraction limon contenait de 42 à 77 % du bore total, le reste se partageant à peu près également entre les fractions argileuses et sableuses (MAURICE, 1971). Des études de ce genre réalisées sur les sols ferrallitiques semblent pour l'instant fort rares, et on ne peut généraliser de tels résultats aux sols en place sans confirmation.

Le manganèse, le cuivre et le zinc

Ces éléments peuvent se fixer sur le complexe d'échange des argiles au même titre que les autres cations, pour autant qu'ils soient sous une forme soluble, donc que leurs composés soient dissociables.

Pour le manganèse, cela ne peut concerner que les formes bivalentes ; en outre, le rôle joué par l'argile apparaît mineur en comparaison de celui du pH, de la complexation de cette forme bivalente par la matière organique ou encore, comme on le verra un peu plus loin, des phénomènes de réduction.

Par contre, le cuivre et le zinc sont énergiquement fixés par l'argile. Cette fixation est si forte dans le cas du cuivre que cet élément s'accumule très facilement dans les sols lors des traitements fongicides, ce qui peut entraîner à la longue des phénomènes de toxicités ; cette éventualité reste encore lointaine en milieu tropical, mais est bien actuelle dans certains vergers et vignobles tempérés ou méditerranéens (DROUINEAU et MAZOYER, 1962).

Ces métaux diffusent à partir de l'ensemble des colloïdes du sol d'une façon très lente qui reste fonction du pH : pour une concentration en zinc donnée (0,5 % de la capacité d'échange), le coefficient de diffusion 3×10^{-7} cm²/sec. à pH 5,0 diminue jusqu'à 1×10^{-8} cm²/sec. à pH 7,2-7,5 (CLARKE et GRAHAM, 1968).

Cette mobilité permet le passage du cuivre et du zinc dans la solution du sol et assure une disponibilité maximale pour la plante, alors que, quantitativement, c'est la matière organique qui assure l'essentiel de cette fourniture. Si argile et matière organique sont

déficientes en même temps, comme cela se passe assez souvent dans les sols sableux, on observera alors le maximum de fréquence et d'acuité des carences et déficiences, en zinc surtout, mais parfois aussi en cuivre (SULLIVAN, 1972).

4.5. APPARITION DE CONDITIONS REDUCTRICES

Lorsque certains facteurs, comme l'hydromorphie, entraînent l'apparition de conditions réductrices, il y a transformation rapide du manganèse tétravalent ou trivalent en manganèse bivalent soluble, ce qui explique l'apparition de toxicité manganique à pH supérieurs à 5,5 (FOY, 1974). Un tel phénomène se produit surtout dans les sols de rizières au moment de la submersion (DEV et SHARMA, 1971).

Habituellement favorisés par un drainage convenable, les sols ferrallitiques y paraissent peu sensibles. Mais on ne peut éliminer entièrement cette éventualité. Des concrétions de manganèse, apparaissant parfois à la limite supérieure de l'horizon B, indiquent qu'au moins à un certain moment de l'année, il y a eu mobilisation de cet élément en milieu réducteur. D'ailleurs, CHENERY (1954) signale que les accidents par toxicité manganique peuvent survenir parfois en Ouganda jusqu'à pH 6,5 pour les sols les plus argileux et SHORROCKS (1964) conseille de maintenir à ce niveau de pH les sols à cacaoyers de Malaisie pour éviter tout ennui.

4.6. LA LIXIVIATION

Fortement retenus par le sol, qu'il s'agisse du complexe colloïdal et surtout de la matière organique (complexation), les oligo-éléments sont assez peu sensibles à la lixiviation par les eaux de drainage.

Le manganèse, rendu soluble en milieu réducteur, a bien tendance à se mobiliser, mais, le plus souvent, en conditions de ferrallitisation, on aboutit seulement à des redistributions sous forme de nodules et concrétions.

Les seuls cas de pertes importantes d'oligo-éléments par lixiviation concernent le bore : des carences en cet élément peuvent apparaître après de fortes pluies ou des irrigations trop abondantes (MALAVOLTA, 1967).

4.7. L'EROSION

L'horizon supérieur des sols ferrallitiques est pratiquement toujours celui qui est le plus riche en éléments minéraux utiles aux plantes. Il s'y ajoute pour les oligo-éléments la réserve que constituent les complexes qu'ils forment avec la matière organique ; d'où l'effet nocif pour les oligo-éléments des décapages superficiels.

4.8. ACTION DES AMENDEMENTS CALCO-MAGNESIENS

Très généralement utilisés pour relever le pH des sols acides, ces amendements ont, par ce biais, une action sur l'assimilabilité des oligo-éléments : ils augmentent celle du molybdène et diminuent celles du bore, du manganèse, du cuivre, du zinc.

Il faut ajouter, dans le cas du zinc, la formation vers pH 7 de zincate de calcium dont la solubilité est faible en milieu neutre, mais augmente fortement dès que le pH devient fortement alcalin. En outre, les cations apportés, comme le calcium et le magnésium, peuvent avoir une action synergétique ou antagoniste avec les oligo-éléments, action détaillée au chapitre XI (p. 255 sq.).

De fait, après de forts apports de calcaire (ou de dolomie) broyé ou de chaux agricole, on voit apparaître déficiences et carences en zinc sur bananiers en Guinée (MOITY, 1954), sur maïs dans les sols « arenito de Bauru » au Brésil (MALAVOLTA, 1967), sur cacaoyer au Ghana (expérience en pots selon CUNNINGHAM, 1964) et également en cuivre sur bananiers en Côte d'Ivoire (DABIN et LENEUF, 1960 ; MOITY, 1961 ; CHARPENTIER et MARTIN-PREVEL, 1961 ; LASSOUDIERE, 1973), déficiences et carences d'ailleurs plus fréquentes et plus aiguës en sols hydromorphes organiques qu'en sols ferrallitiques.

De tels amendements, s'ils font disparaître les toxicités manganiques par insolubilisation du manganèse divalent, peuvent, dans les sols mal pourvus en cet élément, induire des déficiences (assez rares, en fait) chez les plantes cultivées.

Mais le chaulage a aussi pour effet de favoriser la minéralisation de la matière organique et donc de « décomplexer » les oligo-éléments dont elle est presque toujours la principale forme de réserve ; d'où des effets contradictoires dont la résultante est souvent difficile à apprécier à l'avance : ainsi le résultat final apparaît, en définitive, plutôt favorable pour le bore sur blé à Madagascar (1) (OLIVER et *al.*, 1974), ce qui confirme des expériences menées aux Etats-Unis (HATCHER, BOWER et CLARK, 1967). Sans doute est-ce pour cette raison que GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL (1976), après apport de 6 tonnes de CaO dans les sols ferrallitiques désaturés sableux de basse Côte d'Ivoire cultivés en ananas, ont, à l'analyse, trouvé plus de zinc et de manganèse assimilables dans les parcelles chaulées que dans les parcelles témoins (en raison de la faiblesse des teneurs, les variations pour le cuivre et le molybdène ne sont pas significatives). Au vu de ces résultats, il semblerait que le chaulage favorise en définitive le passage des oligo-éléments en réserve vers des formes assimilables. Il faut noter toutefois dans cet essai que l'analyse foliaire a décelé moins de Mn dans les feuilles d'ananas en parcelles traitées par la chaux qu'en parcelles témoins, ce qui amène à tempérer nettement cette conclusion et à se demander si les processus analytiques rendent compte très fidèlement de l'assimilabilité des oligo-éléments pour la plante.

On peut, tout de même, retenir de cette longue analyse que le chaulage est loin d'avoir toujours sur l'assimilabilité des éléments mineurs des effets catrastrophiques.

Mais à ne pas vouloir exagérer en ce domaine les méfaits du chaulage, il ne faudrait pas non plus les minimiser par trop. Il importe dans la pratique agricole de tous les jours d'agir avec prudence et de se souvenir qu'un apport brutal d'amendements calco-magnésiens bouleverse toujours les propriétés du sol, d'où des répercussions parfois inattendues et le plus souvent défavorables. Une précaution élémentaire consiste à ne relever le pH que progressivement et lentement, par touches successives, année après année.

On peut également, comme dans le Campo Cerrado brésilien, inclure quelques kilogrammes d'un mélange d'oligo-éléments divers dans les formules de chaulage (MIKKELSEN et *al.*, 1961), ce qui ne grève que d'un très faible supplément le prix de revient de cette opération coûteuse par elle-même.

4.9. LES ENGRAIS MINERAUX ET L'ASSIMILABILITE DES OLIGO-ELEMENTS

Certains engrais minéraux paraissent favoriser l'assimilabilité des oligo-éléments, mais cette action, surtout nette s'il y a acidification du sol, semble liée aux variations de pH induites par la formule minérale.

---

(1) Il s'agit ici de blé cultivé en saison sèche dans les rizières vidées d'eau, donc sur des sols hydromorphes et non ferrallitiques.

Il faut toutefois faire une mention spéciale au phosphore. On s'est aperçu à la suite des travaux de BINGHAM et *al.* (1958) que de fortes fumures phosphatées déprimaient l'alimentation en bore, cuivre et zinc et au contraire exaltaient l'assimilation du manganèse et aussi du molybdène, ce qui, selon toute évidence, ressort du domaine des antagonismes et synergies entre le phosphore et les oligo-éléments et se trouve étudié plus en détail au chapitre XI (p. 261 sq.).

4.10. LE CHLORE : UN CAS PARTICULIER

On parle assez peu du chlore comme oligo-élément. Et pourtant, son rôle, essentiel dans le métabolisme du végétal, déjà signalé au début du siècle (TOTTINGHAM, 1915), fut largement confirmé ultérieurement (BROYER et *al.*, 1954).

Essentiellement d'origine marine, transporté par aérosols, il peut être absorbé par les plantes directement à partir de l'atmosphère (NYE, 1961 ; MATHIEU et MONNET, 1970). Aussi les déficiences sont-elles rares et apparemment localisées au centre des continents ou dans des micro-climats particuliers (OLLAGNIER, 1973 ; DANIEL et OCHS, 1975), tant qu'il ne s'agit pas d'espèces végétales qui en sont particulièrement friandes comme le cocotier (VON HUEXKÜLL, 1972 ; DANIEL et MANCIOT, 1973).

Mais les plantes peuvent aussi s'alimenter à partir du chlore du sol, qu'il s'agisse du chlore rabattu par les pluies ou de celui qui est apporté par les engrais, essentiellement le chlorure de potassium.

Bien qu'à la suite de GORHAM (1958), MATHIEU et MONNET (1970) pensent que les litières forestières (ici en Côte d'Ivoire) peuvent libérer dans l'atmosphère du chlore gazeux lors des fermentations des résidus végétaux, la dynamique du chlore dans les sols apparaît surtout dominée par la lixiviation.

Très mal retenu par la matière organique et les colloïdes minéraux, le chlore est très facilement entraîné par les eaux de drainage. On considère que c'est l'oligo-élément le plus sensible à la lixiviation, nettement plus que le bore déjà fort sensible (MALAVOLTA, 1967).

Il ne peut s'accumuler sous forme de chlorures — eux-mêmes solubles — qu'en climat sec où l'évapo-transpiration potentielle dépasse largement les précipitations, ce qui ne concerne pratiquement jamais les sols ferrallitiques.

4.11. DISCUSSION : RECAPITULATION

La dynamique des oligo-éléments, molybdène, bore, manganèse, cuivre, zinc, surtout si l'on considère le passage des réserves en formes assimilables, se trouve en premier lieu sous l'influence du pH. Son relèvement diminue l'assimilabilité des éléments traces et sa diminution la fait augmenter. Seul le molybdène fait exception avec un comportement exactement inverse.

La matière organique du sol possède la propriété de complexer les oligo-éléments et de les rendre inassimilables, tout au moins jusqu'à ce que sa destruction par minéralisation les libère. Son rôle est relativement peu accusé pour le molybdène et le bore, il apparaît par contre très important pour le manganèse, le cuivre et le zinc pour lesquels les complexations revêtent une grande intensité. Mais l'importance de la matière organique dans cette dynamique se situe assez loin derrière le pH.

A côté de ces deux facteurs primordiaux, le rôle des colloïdes minéraux apparaît quelque peu mineur. Les fixations (par adsorption) ne se produisent jamais avec la même énergie que les complexations par la matière organique ; les libérations s'en trouvent

facilitées et, de ce fait, ces colloïdes remplissent une fonction de tampon fort utile pour la fourniture régulière aux plantes d'oligo-éléments assimilables si la minéralisation de la matière organique se ralentit (périodes sèches). A noter que zinc et surtout cuivre sont plus énergiquement retenus que manganèse, bore et molybdène.

Quant aux autres facteurs que l'on peut qualifier de « secondaires » : oxydo-réduction, lixiviation, chaulage, engrais phosphoriques..., leur action ne peut prendre de l'importance que si elle prolonge celle du pH d'abord, de la matière organique ensuite.

Ces considérations sur la dynamique des oligo-éléments, résumées ici, apparaissent d'autant plus importantes que les sols ferrallitiques manquent assez rarement de ces corps ; certes, il existe des cas de déficit absolu, mais fort heureusement, il s'agit d'exceptions, qui pour autant que l'on puisse en juger, intéressent principalement les catégories les plus fortement évoluées et les plus acides.

Aussi ne paraît-il pas superflu de passer en revue les principales causes d'excès ou d'insuffisance des sols ferrallitiques en oligo-éléments.

Les toxicités

Elles concernent surtout le manganèse : l'abondance de manganèse total dans le sol n'est pas une condition suffisante ; en général, elle doit se combiner à une baisse de pH par la culture et à la diminution de la matière organique qui lui est souvent associée. La combinaison de ces facteurs peut induire des toxicités redoutables, comme dans la vallée du Niari au Congo, sur les hauts plateaux de Madagascar, etc. On corrige ces toxicités grâce à un relèvement du pH vers 5,5 par chaulage. Si des réductions dues à l'hydromorphie sont susceptibles de se produire, il est souvent bon d'aller jusqu'à pH 6,5.

Les toxicités induites par les autres oligo-éléments, y compris le cuivre, apparaissent tout à fait exceptionnelles et localisées aux sols surmontant les gisements miniers, comme pour le chrome et le nickel en Nouvelle Calédonie.

Les déficiences et carences

Elles préoccupent souvent les agronomes plus que les toxicités :

Molybdène

Les teneurs trop faibles en molybdène total sont rarement mises en cause. Généralement, on rend responsable des accidents un pH trop bas comme dans l'Etat de São Paulo au Brésil ou en Ouganda. Chaulage ou addition de quelques ppm de Mo au sol ont le même effet.

Mais l'exemple des sols ferrugineux tropicaux du Nigéria et du Sénéral, intensément cultivés en arachides, montre qu'il peut apparaître des déficiences absolues en cet élément s'il y a intensification culturale. Il est probable qu'un accident de ce genre est susceptible de se produire en sols ferrallitiques.

Bore

Déficiences et carences apparaissent assez fréquentes sur palmier à huile (Malaysia, Colombie, Congo, Cameroun), théier et caféier en Ouganda et au Zaïre, cotonnier en Côte d'Ivoire, plantations forestières en Afrique orientale, cacaoyers au Nigéria, cultures maraîchères au Brésil (Etat de São Paulo), etc.

Elles surviennent habituellement dans les sols sableux pauvres en matières organiques ou encore au cours de longues périodes sèches. La conjonction de ces deux facteurs provoque le dépérissement des cimes qui se propage progressivement vers le bas, entraînant finalement la mort de la plante (le « die-back » des anglo-saxons).

Parfois, c'est l'intensité de la lixiviation par les eaux de pluie ou d'irrigation qui en est responsable (Brésil), à condition que le sol soit suffisamment filtrant.

Manganèse

Carences et déficiences manganiques sont le plus souvent constatées lors des relèvements trop brutaux de pH. On les trouve également lorsqu'il y a abondance de matière organique dans un sol à réaction neutre ou légèrement alcaline.

Un excès de matière organique seul (en sol acide) conduit rarement à des déficiences : un des rares cas que l'on puisse vraisemblablement lui imputer est celui des plantations de palmiers à huile de la savane de Dabou en Côte d'Ivoire.

Les accidents par défaut de nutrition manganique restent cependant rares en milieu ferrallitique. On les corrige facilement par l'adjonction de quelques kilogrammes de sulfate de manganèse par hectare.

5. CONCLUSION

Le prospecteur en possession de ses relevés de profils et de ses fiches d'analyse peut donner un avis motivé, mais il s'appuie sur des données que, par la force des choses, on considère comme statiques, alors qu'elles sont appelées à évoluer dans le temps. Aussi a-t-a-t-on rassemblé dans ces deux chapitres un certain nombre de faits sur l'évolution dans le sol des éléments chimiques qui conditionnent la fertilité des sols ferrallitiques. Ce texte n'a pas la prétention d'être un guide infaillible, mais de dresser un panorama de ce qui peut arriver dans certaines circonstance en s'appuyant sur des exemples concrets.

Evidemment, plusieurs de ces phénomènes sont connus depuis longtemps, car peu différents de ce qui se passe dans les sols tempérés — l'intensité mise à part —, comme pour les grandes lignes de la dynamique de l'azote ; d'autres prennent un relief particulier en milieu ferrallitique, par exemple les carences en soufre ou l'insolubilisation du phosphore. La rapidité de l'évolution de la matière organique, les conditions chaudes et humides impriment des caractères quelques peu originaux — au moins par l'intensité et la gravité des phénomènes — à tous les processus de lixiviation (azote, soufre, potassium, calcium, magnésium).

Il faut aussi souligner l'apport des deux dernières décades, par exemple la prise de conscience de l'importance de l'aluminium échangeable du sol en fonction du pH, ou plus récemment de l'action de l'ion PO_4^{--} sur la capacité d'échange et, partant, sur la rétention des cations, ou encore le danger des superphosphates concentrés dans les sols acides. Il est certain que des découvertes similaires sont en gestation, ont peut-être déjà fait l'objet de publications sans qu'on ait pu encore se rendre compte de leur impact. Elles ne sont donc pas signalées ici.

Car on est loin de tout connaître en matière de dynamique des éléments chimiques. Les connaissances accumulées représentent un acquis considérable, mais qu'il importe de compléter. Ainsi, on ne sait à peu près rien sur la réorganisation des nitrates des engrais dans le sol ; ou encore si l'on a maintenant des données assez sûres sur la dynamique du phosphore, on n'a pu jusqu'à présent en tirer des conséquences pratiques pour augmenter la fourniture de phosphore aux plantes. On pourrait multiplier les exemples de ce genre.

Au terme de cette étude de la dynamique des éléments, il reste à faire un certain nombre de constats d'ensemble.

Tout d'abord, les formes définies au chapitre VIII. — échangeables, assimilables, non échangeables, totales, de réserve —, ne sont pas stables ; elles évoluent dans le sol en fonction des conditions du milieu, pH, matière organique, présence d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'alumine... et aussi des prélèvements par les plantes. Il y a d'ailleurs un recyclage continu de ces éléments, anions et cations, entre le sol et la végétation, que l'homme perturbe par ses défrichements et ses récoltes, pas totalement d'ailleurs car le sol recueille les cendres et les débris de la végétation originelle, ainsi que les résidus des cultures. Ce recyclage n'empêche pas que les formes de réserve puissent devenir assimilables, par des processus que l'on constate plus qu'on ne les explique. Et il est très vraisemblable que la microflore et la faune du sol jouent là un rôle considérable, à côté des réactions d'ordre chimique ou chimico-physique. Si l'on se place du point de vue de l'agriculteur, le sol se présente comme un milieu toujours en évolution, mais qui possède un important « volant de fertilité » grâce à la transformation des éléments en réserve vers des formes plus assimilables. Le fait que le niveau de fertilité ne corresponde pas toujours aux desiderata de l'agriculteur ne change rien au fond du problème.

En second lieu, il faut souligner le rôle extraordinairement important de la matière organique : elle contient la quasi-totalité de l'azote et du soufre du sol ; plus de la moitié du phosphore se trouve sous forme organique ; la matière organique complexe les oligo-éléments, le cas échéant en diminuant leur toxicité ; la matière organique atténue la nocivité de l'aluminium échangeable ; la capacité d'échange des sols, qui retient sur les colloïdes du sol potassium, calcium, magnésium, est directement fonction de la teneur en matières organiques. On pourrait continuer longtemps cette sorte de litanie, car il n'y a peut-être pas un seul phénomène important de la dynamique des éléments qui ne soit influencé directement ou indirectement par la matière organique du sol, au moins dans les horizons superficiels.

Mais lorsqu'on parle de matières organiques dans le sol, on sous-entend un grand nombre de processus complexes qui aboutissent à sa formation ou à sa destruction. A chaque étape, microflore et faune du sol président à toute transformation. Leur rôle, probablement très important, sinon déterminant, reste encore souvent mal connu, sauf certains cas particuliers comme, par exemple, l'ammonification, la nitrification, ou encore l'action des vers et des termites.

Il n'en reste pas moins que la dynamique des éléments qui conditionnent la fertilité des sols est, dans une mesure que l'on apprécie mal, un reflet de cette vie intense qui existe dans les sols. Il y a là un domaine immense à explorer afin de mieux connaître les possibilités agricoles des sols ferrallitiques, possibilités que les appréciations statiques de bases échangeables, de phosphore assimilable... ne peuvent cerner complètement.

les équilibres entre les éléments chimiques du sol

antagonismes-synergies-interactions

« The arable soil needs a balanced supply of plant nutrients. »
KELLOG et ORVEDAL (1969)

1. INTRODUCTION

C'est un lieu commun de dire que la plante s'alimente à partir des éléments chimiques présents dans le sol, ou plutôt à partir de leurs formes solubles qui passent aisément dans la solution du sol. On a d'abord cherché à préciser (et on y est souvent parvenu) les quantités optimales de ces éléments.

Déjà les premiers grands agronomes du XIX^{e} avaient pressenti que les teneurs des uns n'étaient pas sans influence sur l'assimilabilité des autres et, LIEBIG, dans sa fameuse proposition, plus connue sous le nom de loi du minimum, laisse entrevoir en filigrane la nécessité d'une certaine proportionnalité entre ces éléments. Mais il revient apparemment à l'allemand LOEW (1892) le mérite d'avoir le premier défini, à la fin du siècle dernier, la nécessité d'une balance adéquate entre le calcium et le magnésium du sol et d'avoir ainsi attiré l'attention sur la notion d'équilibre entre les divers nutriments élémentaires.

Malgré les travaux effectués depuis lors dans les pays tempérés, les études concernant les équilibres dans les sols des régions tropicales n'ont véritablement pris leur essor qu'après la seconde guerre mondiale. Et malgré les résultats acquis, il existe des disparités considérables entre les différentes catégories d'éléments. On a obtenu un ensemble à peu près satisfaisant de données originales propres aux sols « tropicaux » pour les anions et cations majeurs qui ne soit pas un simple décalque des « trouvailles » faites en Europe et aux Etats-Unis ; par contre, pour les oligo-éléments, on en est parfois réduit à transposer des résultats obtenus en solution nutritive ou en sols tempérés en faisant des hypothèses sur la façon dont ils peuvent s'appliquer aux sols ferrallitiques.

Tous les travaux de physiologie végétale ont montré combien est nécessaire dans les sucs cellulaires une balance convenable entre les divers nutriments pour la bonne santé des organismes végétaux ; comme l'alimentation provient du sol, il est logique de penser que toute anomalie dans le sol se répercutera au moins dans une certaine mesure dans l'organisme végétal sur les facteurs indispensables à une bonne productivité des cultures.

On a l'habitude de caractériser les actions réciproques des éléments cationiques et anioniques du sol par les mots « antagonisme » si ces actions s'opposent et « synergie » si, au contraire, un de ces éléments favorise l'absorption d'un autre ou de plusieurs autres. Quant à l'appellation « intéraction », elle prend un sens particulier en agronomie où on la réserve aux effets réciproques des nutriments entre eux lors des essais d'engrais à plusieurs niveaux, effets parfois décelés seulement par un calcul statistique interprétatif ; on parlera alors d'intéractions positives ou négatives, mais l'objet de cet ouvrage n'étant pas la fertilisation proprement dite, il y sera assez peu question d'intéractions au sens strict.

Ces appellations « synergie » et « antagonisme » recouvrent en fait des notions dont la limite entre elles reste quelque peu mouvante, parce que dépendante des conditions édaphiques ; il n'est pas rare qu'une synergie se mue en antagonisme, et réciproquement, selon que l'un des éléments en cause se trouve ou non dans la zone optimale d'utilisation par la plante (MARCHAL, MARTIN-PREVEL, MELIN, 1972).

Il n'entre pas dans le cadre de cette étude d'examiner les mécanismes d'échange entre solution du sol et racines absorbantes. Mais il est important de souligner que la plante manifeste une spécificité certaine à l'égard de certaines catégories d'ions.

C'est d'abord une spécificité entre anions et cations, ces deux grandes catégories d'ions que l'organisme végétal absorbe selon des modalités différentes.

A l'intérieur de chaque catégorie, les ions devraient, en principe, être absorbés en fonction de leur concentration, c'est-à-dire en fait dans la solution du sol. Mais ce n'est pas tout à fait ce qui se passe en réalité, car il faut tenir compte de la mobilité de chacun d'eux : ainsi, dans la famille homogène des ions alcalins et alcalino-terreux, le potassium très mobile sera absorbé de préférence au magnésium moins « agile » et surtout au calcium qui montre une inertie certaine lors de son passage à travers les membranes des racines, d'où une sélectivité de la plante due à cette inégale diffusibilité (MARTIN-PREVEL et DUGAIN, 1962).

Cette sélectivité, qui aboutit à une compétition (du fait des concentrations très inégales de ces trois ions dans la solution du sol), est en fait une régulation très utile pour l'alimentation minérale de la plante : un peu de potassium freinera très efficacement l'absorption du magnésium ou du calcium qui, pénétrant en excès dans les cellules, pourraient provoquer des désordres physiologiques. La compétivité se révèle donc un processus fort efficace pour réduire les toxicités dues à une alimentation déséquilibrée.

Réciproquement, si un ion manque dans le cortège calcium, magnésium et potassium (on devrait ajouter le sodium s'il n'était présent qu'en quantités minimes dans les sols ferrallitiques), la plante a tendance à le remplacer par un autre ou par plusieurs autres, afin de conserver une charge constante Ca + Mg + K (+ Na), même s'il en résulte des dommages physiologiques importants.

La dilution, dans les solutions des sols au complexe absorbant très désaturé, introduit une difficulté supplémentaire dans l'interprétation de ces phénomènes complexes : un élément absorbé en surplus par la plante peut favoriser l'entrée d'un autre — cas net de synergie —, mais dans des proportions tellement plus faibles que l'augmentation de sa propre absorption que le résultat final aura toutes les apparences d'un antagonisme.

Etant donné les différences de propriétés chimiques, il ne devrait pratiquement pas y avoir d'interrelations entre cations et anions ; on verra plus loin que ce n'est pas absolument le cas, mais, bien souvent, il y a doute pour savoir si un autre processus (pH, dynamique propre à chaque ion, etc.) n'intervient pas en lieu et place des synergies ou antagonismes.

Quant aux oligo-éléments, la faiblesse de leurs teneurs dans le sol, la faculté qu'ont beaucoup d'entre eux de se comporter comme des acides faibles ou des bases faibles en fonction du pH du sol, introduisent un facteur « erratique » de telle sorte qu'on ne sait jamais trop si on doit les considérer comme des anions ou des cations.

Bien qu'incomplètes, ces considérations sur les processus antagonistes et synergétiques entre nutriments, largement inspirées de l'excellent exposé de MARTIN-PREVEL et DUGAIN (op. cit.) permettront sans doute au lecteur de se rendre compte de la complexité de ces actions réciproques entre ions qui concourent à l'alimentation des plantes, à défaut de saisir le détail de mécanismes dont l'étude ne rentre pas dans le cadre de cet ouvrage.

Tous les types de sols sont évidemment concernés par les équilibres entre éléments minéraux. Toutefois, les sols ferrallitiques possèdent un certain nombre de caractéristiques qui peuvent en augmenter l'importance. A vrai dire, pris dans leur ensemble, ils ne sont pas beaucoup plus affectés que d'autres par des déséquilibres lorsqu'ils sont mis en culture. Cependant, il ne faut pas oublier trois facteurs :

— ils ne possèdent en général plus, ou presque plus, de minéraux primaires (infiniment moins en tout cas que les sols des zones semi-arides ou tempérées), d'où, pour la plante,

une difficulté supplémentaire de compenser un déficit d'éléments assimilables ou échangeables en allant puiser dans des réserves dites non-assimilables mais où les racines arrivent quelque peu à s'alimenter,

— ils ont un complexe d'échange non seulement peu élevé en valeur absolue mais encore faiblement saturé par les bases dans beaucoup de cas,

— ils subissent souvent des conditions d'acidité telles que le phosphore en devient faiblement assimilable et que l'azote n'est pas toujours libéré avec assez de rapidité pour nourrir les plantes.

On peut donc craindre que des cultures successives n'engendrent un « épuisement » du potentiel chimique des sols ferrallitiques qui naturellement sera plus rapide pour certains éléments que pour d'autres, d'où des déséquilibres.

Ces déséquilibres peuvent naturellement préexister dans les sols sous végétation naturelle. Le prospecteur devra surtout y prendre garde s'il s'agit de jachère récente, de savane ou de forêt claire ou mal venue. En effet, si l'on a affaire à une forêt équatoriale dense, l'incinération (ou la décomposition sur place en andains rapprochés) de cette énorme masse végétale apporte une quantité de nutriments telle que NYE et GREENLAND (1960) l'estimaient dans les riches sols du Ghana supérieure à ce que le sol possédait en propre. Que dire alors des sols très pauvres d'Amazonie, du Gabon, du Congo, etc., sinon que la plus grande partie de leur fertilité potentielle se trouve au-dessus d'eux, dans la végétation forestière qui les couvre. Un tel apport lors du défrichement modifie totalement la proportionalité entre ces éléments dans le sol et ceci, fort heureusement, dans un sens favorable le plus souvent (LAUDELOUT et VAN BLADEL, 1967).

Par contre, au bout de quelques années de culture, des déséquilibres peuvent très fréquemment apparaître.

Ce sera l'objet de ce chapitre d'examiner et de discuter ces interrelations entre nutriments, anions, cations et oligo-éléments, présents dans le sol à un moment donné.

2. CONDITIONS DE L'ETUDE

Dans tout ce chapitre, les nutriments ne seront évalués que sur la couche arable du sol (une quinzaine ou une vingaine de centimètres de profondeur) dans le cas de cultures annuelles ou encore sur l'ensemble des horizons explorés par la majeure partie des racines des plantes pérennes, soit en gros jusqu'à trente ou cinquante centimètres ; il est évident qu'une certaine quantité de racines vont plus profondément et peuvent, de ce fait, corriger un éventuel déséquilibre dans la partie superficielle du sol. Malgré tout, c'est cette dernière qui joue le rôle principal dans l'alimentation minérale.

En ce qui concerne les modes d'expression des nutriments minéraux, surtout lorsque ceux-ci sont chiffrés, on se conformera aux processus analytiques suivis par les inventeurs ou les principaux utilisateurs des équilibres. C'est ainsi qu'azote total et phosphore total seront mesurés respectivement par la méthode Kjeldhal et après attaque à HNO_3 concentré et bouillant et le phosphore assimilable selon la méthode Bondy. Les cations minéraux du sol seront évalués en milliéquivalents de cations échangeables pour 100 grammes de sol. Quant au pH, il s'agira toujours de pH(H_2O) dans la proportion 1 (sol) - 2,5 (eau) pour les auteurs francophones, parfois 1/1 pour les autres (anglophones en particulier).

On doit considérer que les équilibres étudiés ici se rapportent à un état instantané du sol et ne tiennent pas compte d'une éventuelle transformation, avec le temps, des réserves en formes assimilables, ni des variations saisonnières.

3. EQUILIBRES ENTRE CATIONS ET ANIONS

3.1. EQUILIBRE CARBONE-AZOTE

Le rapport C/N quantifie l'un des équilibres les plus connus existant dans le sol. Aussi suffira-t-il de rappeler quelques-unes des valeurs qui caractérisent le mieux la minéralisation de l'humus et, partant, la fourniture d'azote aux plantes.

C/N < 9 — Rapport bas. La minéralisation de la matière organique est rapide, d'où parfois fourniture excédentaire d'azote aux plantes (d'où pertes d'azote) si les autres facteurs, température, pH, sont favorables.

C/N compris entre 9 et 12 — Valeurs normales. La minéralisation de la matière organique s'effectue normalement ; il y a donc fourniture « normale » d'azote aux plantes, en fonction de la teneur du sol en matières organiques.

C/N compris entre 12 et 25 — En sol sous végétation naturelle, les processus d'accumulation de matière organique ont tendance à l'emporter sur la minéralisation. De fait, si on met le sol en culture, la minéralisation apparaît de plus en plus lente au fur et à mesure que la valeur de C/N croît.

C/N > 25 — La minéralisation est arrêtée et ne peut se produire qu'avec un apport extérieur d'azote.

On peut noter que beaucoup de sols ferrallitiques ont des rapports C/N de l'ordre de 12 à 15 sous végétation naturelle, valeurs qui tombent assez aisément entre 10 et 12 dès qu'ils sont cultivés. Des rapports C/N de l'ordre de 16 et plus n'existent guère que pour les sols ferrallitiques d'altitude ou chez ceux qui sont très acides (pH $\leqslant 4{,}5$), dont la matière organique s'humifie mal.

3.2. EQUILIBRE AZOTE-PHOSPHORE

Le rapport N/P_2O_5

L'importance de ce rapport fut mise en évidence en Afrique francophone par DABIN (1954 et 1956) pour les cultures irriguées du delta central nigérien (Mali) ; il s'est révélé valable pour toutes les cultures et pour tous les types de sols dans une large gamme, allant des sols ferrallitiques très désaturés sous une pluviométrie de 2 000 mm aux sols subdésertiques qui ne reçoivent que 200 à 300 mm de pluie (1).

Ce rapport est considéré comme convenable s'il est compris entre 2 et 4

$$4 > \frac{\text{N total } ^\circ/_{oo}}{P_2O_5 \text{ total } ^\circ/_{oo}} > 2$$

— entre ces deux limites, un tel rapport implique un bon équilibre entre les alimentations phosphoriques et nitriques, mais évidemment il ne préjuge en rien du niveau de cette alimentation,

— si $N/P_2O_5 > 4$, le sol est fortement déficient en phosphore ; il est inutile de lui fournir des engrais azotés si le taux de phosphore n'a pas été préalablement relevé,

(1) Le rapport N/P_2O_5 a été étudié en particulier par DABIN (1954 et 1956) au Mali, TIDBURY (1956) à Zanzibar, DABIN et LENEUF (1960) en Côte d'Ivoire, LE MARE (1959) et KABAARA (1964) au Tanganika, BORGET et *al.* (1967) en République Centrafricaine, NGO-CHANG-BANG (1967) à Madagascar, BOUYER (1967) pour l'ensemble des sols tropicaux d'Afrique, COPE et HUNTER (1967) pour les sols tempérés et tropicaux. Sa portée est donc très générale.

– si $N/P_2O_5 < 2$, le sol relativement bien pourvu en phosphore manque d'azote ; les engrais phosphatés sont inutiles, mais les engrais azotés « marqueront »,

– si $4 \leqslant \frac{N}{P_2O_5} \leqslant 2$, tout apport d'engrais phosphatés doit être accompagné d'une fourniture équivalente d'azote et réciproquement ; sinon, on risque un déséquilibre dans l'alimentation minérale des cultures.

Quelques restrictions à l'emploi du rapport N total/P_2O_5 total

Le rapport N/P_2O_5 total ne fait intervenir que le phosphore total et l'azote total sans préjuger ni de la nature des formes du phosphore, ni de la vitesse de minéralisation de l'azote, ni des taux de ces éléments dans le sol. D'où un certain nombre de restrictions et d'adaptations apportées à son emploi (DABIN, 1961, MOULINIER, 1962, etc.) :

– pour des pH du sol inférieurs à 5-5,5, les valeurs du rapport N/P_2O_5 doivent être interprétées avec beaucoup de prudence étant donné la forte insolubilisation, à ces valeurs de pH, du phosphore sous forme de phosphore lié au fer, difficilement assimilable par les plantes,

– dans les sols pauvres en azote (0,20 à 0,30 °/oo d'azote total), le besoin en engrais phosphatés se situe déjà à des valeurs de N/P_2O_5 proches de 2,

– dans les sols très riches en matières organiques (ayant de ce fait 4 °/oo et plus d'azote, le rapport N/P_2O_5 peut dépasser 4, sans que se manifeste un besoin en phosphore,

– toutefois, pour les plantes ayant de grands besoins en phosphore, comme le cacaoyer, le rapport N/P_2O_5 doit rester proche de 2, même si le sol est bien pourvu en matières organiques (MOULINIER, 1962 ; JADIN, 1972).

Le rapport r = P_2O_5 assimilable °/oo/N total °/oo

Afin d'éliminer les inconvénients résultant de l'emploi du phosphore total, on a proposé d'utiliser le rapport N total/P_2O_5 assimilable où P_2O_5 assimilable est déterminé par la méthode Bondy (VIZIER, 1965 ; DABIN, 1970-a).

Si $10 < r < 20$, le rapport est optimum ; à toute fourniture d'azote devra correspondre un apport équilibré de phosphore,

Si $r < 10$, le sol a plus besoin d'engrais azotés que d'engrais phosphatés,

Si $r > 20$, la carence en phosphate est nette et dans tous les cas supérieure à une éventuelle déficience en azote ; le sol manque en premier lieu de phosphore.

Confirmant cette interprétation, on a constaté en moyenne Côte d'Ivoire (BOUCHY, 1973) que ce rapport était un meilleur indicateur de l'alimentation en phosphore du cotonnier que la valeur absolue du phosphore assimilable dans le sol.

Essai d'interprétation du rapport N/P_2O_5

On a parfois voulu voir dans ce rapport une simple application de la loi du minimum : à chaque niveau d'azote correspondrait un seuil minimum en phosphore et réciproquement. On a également invoqué l'acidification induite par les engrais azotés qui pourrait accélérer la solubilisation des phosphates de calcium, ainsi que la stimulation de l'activité bactérienne par un rapport de phosphate, activité qui favoriserait une minéralisation accélérée de la matière organique, d'où une fourniture supplémentaire d'azote (COPE et HUNTER, 1967) et aussi de phosphore à partir du sol.

Outre que l'acidification du sol est généralement plus néfaste qu'utile dans la majorité des sols tropicaux et pour les sols ferrallitiques en particulier, il apparaît au vu d'essais

d'engrais qu'il y a une véritable interaction positive (1) entre l'azote et le phosphore (TIDBURY, 1956 à Zanzibar, LE MARE, 1959 en Tanzanie, BOUYER, 1967 en Afrique Noire, UMMAR AKBAR et *al.*, 1976 à Sumatra), l'apport de phosphate pouvant même, en stimulant l'alimentation en azote, réduire le lessivage des nitrates (KABAARA, 1964).

En résumé

Les rapport N total/P_2O_5 total et N total/P_2O_5 assimilable Bondy sont en équilibre dans le sol pour des valeurs comprises respectivement entre 2 et 4, et 10 et 20, pour lesquelles toute fourniture d'azote doit s'accompagner d'un apport équivalent de phosphore et réciproquement. Pour des valeurs respectivement inférieures à 2 et 10, le sol manque d'azote, mais est (relativement) bien pourvu en phosphore. Pour des valeurs respectivement supérieures à 4 et 20, le besoin en phosphore est supérieur à celui d'azote.

Bien que l'on connaisse mal les mécanismes de cette synergie Azote-Phosphore, les essais d'engrais permettent d'affirmer qu'il correspond bien à une intéraction positive.

3.3. L'EQUILIBRE AZOTE/SOUFRE ET LES INTERACTIONS AZOTE-SOUFRE

Le rapport Azote/Soufre dans le sol

DABIN (1970-b) constate que des rapports $\frac{\text{N total}}{\text{S total}}$ voisins de 10 sont fréquents dans les sols d'Afrique Occidentale et Centrale et qu'ils paraissent caractériser un bon équilibre entre ces anions. On a même trouvé des rapports N/S compris entre 10 et 5 dans certains sols du Nigéria occidental (OKE, 1970) (2), sans que ces sols présentent apparemment de déséquilibres se traduisant par des déficiences en azote par rapport au soufre.

On connaît mal la limite supérieure du rapport N/S compatible avec une bonne croissance des plantes. Toutefois, comme les protéines végétales possèdent un rapport N/S de l'ordre de 15, il est logique de penser que la décomposition d'un humus ayant un rapport supérieur à cette valeur fournit aux racines trop d'azote et pas assez de soufre. De ce fait, un rapport N/S de l'ordre de 10 paraît satisfaisant (STEWART, 1969) dans tous les cas.

On sait que, dans certains sols (sols de savane) où de fortes carences en soufre apparaissent après défrichement, ces carences s'atténuent au fil des ans. On peut supposer qu'après avoir intéressé des formes particulièrement riches en N (et pauvres en soufre), la minéralisation de la matière organique se fait ensuite à partir de composés organiques mieux équilibrés en azote et soufre.

Interaction Azote-Soufre

On a montré, tant en solution nutritive (HOMES, 1964) que par des essais d'engrais, en particulier sur cotonnier au Malawi (MATTHEWS, 1972), qu'il existe une véritable interac-

---

(1) On a parfois constaté des interactions négatives apparentes N-P lors des essais d'engrais, en particulier sur des alluvions provenant de basaltes ferrallitisés de Madagascar (BOUYER, 1967). Il semble que l'on doive les attribuer à d'autres causes : carence en potasse dans le cas précis de Madagascar, ou encore à la synergie Phosphore. Manganèse, si on utilise des superphosphates triples dans des sols à réaction acide de pH $\leqslant$ 5 (LE MARE, 1977-b), cf. p. 261.

(2) Ces valeurs sont proches de celles indiquées par BETTANY et *al.* (1973) pour deux types de sols du Saskatchewan canadien, soit en moyenne 6,4 pour des sols bruns tchernozémiques acides et 10,6 pour des « grey wooded soils » lessivés.

tion Azote-Soufre, interaction constatée également sur des sols autres que ferrallitiques, par exemple par OLLAGNIER et OCHS (1972) sur les sables côtiers de Madagascar.

De leur côté, MARCHAL, MARTIN-PREVEL et MELIN (1972) déclarent que « l'absorption du soufre par le bananier améliore l'utilisation de l'azote et permet ainsi la valorisation d'un supplément d'urée inefficace par lui-même ». D'où l'attention portée à l'équilibre N/S dans les engrais. Ainsi, en zones carencées en soufre de la République Centrafricaine, on a longtemps utilisé pour la fumure minérale du cotonnier, un rapport N/S = 1 (BRAUD, 1964), bien qu'actuellement N/S = 2 paraisse satisfaisant (IRCT, 1969).

Lorsqu'il n'y a pas de déficience manifeste en soufre, des rapports N/S de 3 à 8 se révèlent suffisants dans les formules d'engrais minéraux.

3.4. INTERACTION POSITIVE SOUFRE-PHOSPHORE OU ANTAGONISME ?

Etudiant la nutrition minérale du cotonnier et de l'arachide en solution nutritive, HOMES (1964) pense qu'il existe une interaction positive soufre-phosphore.

Cette interaction positive fut retrouvée au cours d'un essai d'engrais sur riz pluvial dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés de Grimari en République Centrafricaine (COLONNA, 1967).

Il serait toutefois dangereux de conclure à une interaction dans tous les cas où l'addition à la fois de soufre et de phosphore donne de bons résultats, car il peut s'agir d'une carence simultanée en ces deux éléments, plus souvent observée d'ailleurs en sols ferrugineux tropicaux (CHAMINADE, 1965) qu'en sols ferrallitiques, mais qui peut y exister aussi.

Il faut également citer l'opinion de MARCHAL, MARTIN-PREVEL et MELIN (1972) qui écrivent à propos de la carence en soufre du bananier : « l'accumulation de l'azote dans les feuilles des bananiers du secteur II (carence en S.) traduit leur retard de croissance par rapport au secteur I (pas de carence en S.). Leur déficience combinée en soufre et en manganèse s'accompagne surtout d'un enrichissement en phosphore, dont le responsable est certainement le défaut de soufre : en effet, en hydroponique, on a constaté cet antagonisme, dans les feuilles âgées, de la carence en soufre, mais pas chez les bananiers carencés en manganèse. »

Evidemment, à un antagonisme dans les feuilles peut correspondre une synergie dans le milieu nutritif. De ce fait, cet exposé sur l'équilibre P/S est assez représentatif des incertitudes que l'on trouve souvent dans l'étude de ces équilibres.

3.5. EQUILIBRE PHOSPHORE-SILICE

Il semble que l'un des premiers auteurs à faire mention d'actions réciproques entre phosphore et silicium, soit FISCHER (1929) ; il avait en effet observé que l'adjonction de silicate soluble à un sol augmentait l'absorption du phosphore par la plante cultivée, ici de l'orge. On eut tendance, jusque sur la fin des années soixante, à expliquer la meilleure disponibilité du phosphore en présence de silicate par des effets indirects : apport de calcium et élévation du pH, ou réduction des sites possibles de fixation du phosphore par l'anion silicique, ou encore développement de charges négatives dans le sol (divers auteurs cités par SILVA, 1971).

Quoi qu'il en soit, ROY en 1969 (cité par SILVA, op. cit.) a démontré qu'il existait, en solution nutritive, une véritable interaction Si-P au niveau des racines de la plante. Mais si l'application d'un silicate augmente l'absorption du phosphore pour les plantes qui accumulent peu de silice dans leurs tissus, c'est l'inverse qui se produit chez celles qui ont tendance à stocker de la silice. Suivant les espèces végétales, il y a donc synergie ou antagonisme !...

En ce qui concerne les sols, TAKAHASHI (1968) avait montré que, dans les sols à fort pouvoir fixateur pour le phosphore, la silice empêche, partiellement, cette fixation, libère une partie du phosphore fixé et améliore en définitive la quantité de phosphore assimilable. Il s'agissait là d'un sol hydromorphe de rizière situé au Japon. Mais ROY et *al.* (1971) ont fait la même constatation sur les latosols des Hawaï : un apport de silicates — ici $CaSiO_3$ — permet de diminuer la quantité de phosphate à apporter pour obtenir 0,2 ppm dans la solution du sol.

TABLEAU XI.1. — *Phosphore à ajouter en présence ou non de silicate pour avoir 0,2 ppm de P dans la solution du sol dans trois latosols des Hawaï d'après* ROY *et* al., *1971*

	Sol	Ca Si O_3 ajouté en ppm de Si		
		0	250	500
Série	Soil taxonomy	Phosphore à ajouter en ppm		
Leilehua	Tropeptic Eutrorthox	187	125	100
Wahiawa	Humoxic trophumult	425	325	250
Kapaa	Typic gibbsihumox	725	625	500

On remarquera sur le tableau XI.1. que le troisième sol, très riche en gibbsite et goethite, possède un pouvoir de fixation pour le phosphore nettement plus élevé que les deux premiers (sols à kaolinite).

Il apparaît effectivement que, dans le sol, les anions phosphate et silicate, ayant entre eux une grande similitude de propriétés physico-chimiques, se trouveront en compétition pour se fixer sur les hydroxydes en déplaçant des ions H_2O et surtout OH^- à la surface de ces colloïdes (HINGTON et *al.*, 1972 et 1974). En fait, bien que l'adsorption de ces deux anions obéisse aux équations de Langmuir, il n'y a pas totale réciprocité : la présence de phosphate gêne toujours l'adsorption des silicates quel que soit le pH (pH 3 à pH 12) ; par contre, la présence de silicate est sans effet sur l'adsorption des phosphates de pH 3 à pH 6,5-7 ; à pH plus élevé, pH 7 à pH 12, elle la diminue. Ces résultats obtenus en laboratoire sur des sols (dont certains sont ferrallitiques) et des oxydes de fer par OBIHARA et RUSSELL (1972), partiellement confirmés par HINGTON et *al.* (op. cit.) paraissent en contradiction apparente avec ceux de ROY et *al.* (op. cit.) ; il est vrai qu'ils furent le fruit d'expériences effectuées *in vitro* et que le sol ne peut pas toujours se résumer à un matériau inerte et synthétique.

Il semble donc prématuré de tirer une conclusion définitive des actions réciproques entre silicium et phosphore. On peut toutefois retenir l'opinion de PIERI (1977) à propos de l'excellente disponibilité pour les cultures du phosphate tricalcique mis dans les sols du Sénégal, sols ferrugineux tropicaux Dior et sols ferrallitiques rouges de Casamance ; il attribue cette propriété à la « silice active » provenant de la dissolution des quartz très fins que ces sols contiennent en abondance ; et cette silice pseudo-colloïdale pourrait jouer un rôle effectif en améliorant la nutrition en phosphore des plantes cultivées à partir du sel difficilement soluble qu'est le phosphate tricalcique sous un climat déjà marqué par une forte saison sèche ou même l'aridité.

Si le mécanisme de ces actions entre silice et phosphore est compliqué, le résultat apparent est une synergie. On peut ajouter que, sauf pour les sols à hydroxydes de fer et d'alumine dominants, il est rare que les sols ferrallitiques manquent de silice de façon nette.

4. EQUILIBRES ENTRE CATIONS MAJEURS

4.1. ANTAGONISME CALCIUM-MAGNESIUM. RAPPORT Ca/Mg

On a constaté un antagonisme net entre calcium et magnésium du complexe absorbant du sol, la présence de l'un réglant l'absorption de l'autre par les racines et inversement.

En solution nutritive, des teneurs très basses en calcium ont pour conséquence un accroissement considérable du niveau de la nutrition magnésienne de la plante (divers auteurs cités par SINGH et SHARMA, 1972), avec pour corollaire une toxicité du magnésium absorbé en surplus des besoins de l'organisme. Pour JONES (1951), cet effet toxique pourrait parfois être dû à la formation, à partir du magnésium en excès relatif, d'hydroxyde $Mg(OH)_2$ lorsque celui-ci provoque une élévation marquée du pH.

Il semble par contre qu'un large excès de calcium par rapport au magnésium n'ait pas, selon ces auteurs, les mêmes inconvénients. L'ion calcique, peu mobile, pénètre plus difficilement que le magnésium dans les racines et il se meut ensuite plus malaisément dans l'organisme végétal où il s'accumule souvent sous forme de composés insolubles (oxalates de calcium).

Valeur optimale du rapport Ca/Mg

Etudiant le rapport Ca/Mg dans les sols à bananiers de Guinée (sols ferrallitiques fortement désaturés et sols alluviaux désaturés), MARTIN-PREVEL (1969) fixe vers 1,5 la valeur optimale de Ca/Mg.

Il est vrai que le bananier est très avide de magnésium. Aussi n'est-il pas étonnant que, pour la majeure partie des cultures tropicales, des valeurs de 1,5 à 5 soient dans l'ensemble tout à fait satisfaisantes (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958 ; DABIN, 1970 ; JADIN, 1972 ; GODEFROY et *al.*, 1978 ; etc.).

C'est en particulier le cas du caféier Arabica au Kenya, pour lequel MEHLICH (1968) a situé l'optimum de la relation Ca/Mg entre 2 et 4.

Etudiant les sols d'une ferme au Congo, MARTIN (1979) accepte une fourchette allant de 1,4 à 6 ou 7, ceci pour diverses cultures.

Valeur minimale du rapport Ca/Mg

On considère généralement qu'un rapport Ca/Mg égal à 1 est la limite inférieure acceptable pour un sol cultivé. D'abord définie en milieu tempéré, cette limite est acceptée par FAUCK, MOUREAUX et THOMANN (1969), pour les sols rouges ferrallitiques peu désaturés du sud du Sénégal. Elle devrait, par contre, être un peu supérieure à 1 pour les sols à cacaoyers de Côte d'Ivoire (JADIN, op. cit.).

Il est toutefois douteux que, pour certaines plantes, comme l'ananas, acidophiles, friandes de magnésium, redoutant les sols trop chargés en calcium (MARTIN-PREVEL, 1961) que cette limite inférieure du rapport Ca/Mg, soit 1, ait alors une importance primordiale. En ce qui concerne l'hévéa en Malaisie, COULTER (1972) paraît considérer que des teneurs du sol en magnésium échangeable de 0,10 à 0,15 mé/100 g et en calcium échangeable de 0,05 à 0,09 mé/100 g sont encore compatibles avec un rendement convenable en latex, ce qui implique des rapports Ca/Mg quelque peu inférieurs à 1.

Valeurs maximales du rapport Ca/Mg

HARDY (1958 et 1960) et WESSEL (1967) fixent à 4 la limite supérieure du rapport Ca/Mg acceptable pour les sols à cacaoyers respectivement en Amérique Centrale et au

Nigéria. Toutefois, RAJWANSKY (1957) constate que, dans le « Cocoa Belt » du Ghana, les valeurs de ce rapport s'échelonnent entre 3 et 7, la majeure partie se situant entre 4 et 7, sans qu'on puisse déceler des inconvénients provoqués par ces valeurs.

Par contre, les premiers symptômes de déficience magnésienne (liée au rapport Ca/Mg) apparaissent épisodiquement sur bananiers quand Ca/Mg dépasse 5 et se généralisent si Ca/Mg est supérieur à 10 (GODEFROY et *al.*, 1978). Bien qu'il s'agisse ici d'un sol hydromorphe organique de Côte d'Ivoire, il est probable qu'on peut extrapoler ce résultat aux sols ferrallitiques.

En fait, il semble bien que dans le sol, tout comme dans les solutions nutritives, un excès raisonnable de calcium par rapport au magnésium soit sans grand inconvénient pour la majeure partie des plantes cultivées ; dans l'exemple, cité plus haut, des bananiers déficients en magnésium, il n'y a pas eu de répercussion sensible sur les rendements, bien que, en d'autres occasions, le bananier réagisse de façon défavorable, par la maladie dite de la pulpe jaune, à un complexe absorbant trop riche en calcium (MELIN, 1970).

Les plantes annuelles dans l'ensemble sont apparemment plus tolérantes à un rapport Ca/Mg élevé que les plantes pérennes. Le cas est particulièrement net pour les légumineuses, famille connue pour son avidité pour le calcium : l'arachide et le soja paraissent supporter des valeurs de Ca/Mg allant jusque vers 30 et même 40 ou 50.

Le rapport Ca/Mg et la structure du sol

Lorsque la teneur du sol en magnésium échangeable augmente aux dépens du calcium échangeable, la structure du sol devient plus grossière et plus instable ; ce phénomène paraît dû à la forte dimension des ions Mg hydratés, propriété qui leur donne des effets dispersants en quelque sorte voisins de ceux du sodium, bien que d'intensité moindre (LIU CHANG LANG, 1976).

Les effets du magnésium sur la structure pourraient débuter dans les sols tempérés dès que Ca/Mg est inférieur à 12 (SOLTNER, 1971). Or ce chiffre se trouve à peu près en accord avec les résultats obtenus avec le test Is de HENIN (HENIN et MONNIER, 1958) dans les sols du Nord-Est du Brésil (LOPES, 1978).

$Ca/Mg > 11$	Très forte stabilité de la structure
$7{,}6 < Ca/Mg < 11$	Forte stabilité
$1{,}0 < Ca/Mg < 7{,}6$	Stabilité moyenne
$Ca/Mg < 1$	Stabilité faible.

(Evidemment, on peut se poser la question de savoir si cette « stabilité moyenne » n'est pas encore tout à fait satisfaisante pour les cultures).

Bien que cette expérience incluât deux sols ferrallitiques, il semble bien que cette classe de sols ne soit que modérément sensible aux effets du rapport Ca/Mg sur la structure, surtout parce que les argiles kaolinitiques dominent très largement le complexe colloïdal et que matière organique et fer conditionnent au premier chef les propriétés structurales.

En résumé

On peut préciser pour ce rapport Ca/Mg :

— Limite inférieure : $\frac{Ca}{Mg} = 1$ (valeur moyenne) ; les plantes acidophiles, ananas, hévéa, théier, se contentent de rapports un peu inférieurs à 1, tandis que pour les neutrophiles, comme le cacaoyer, il est préférable de mettre la limite vers 1,2.

— Limite supérieure : $\frac{Ca}{Mg}$ entre 4 et 10 pour les plantes pérennes pouvant aller jusqu'à 30 ou 40 pour les plantes annuelles et les légumineuses, peut-être même 50.

— Valeurs optimales : $\frac{Ca}{Mg}$ entre 1,5 et 4 ou 5 pour les plantes pérennes, 1 à 10 ou 12 pour les plantes annuelles et les légumineuses.

4.2. ANTAGONISME MAGNESIUM-POTASSIUM ET RAPPORT MAGNESIUM-POTASSIUM

On a remarqué qu'un apport d'engrais potassiques sur un sol faiblement pourvu en magnésium provoque une absorption exagérée de potassium qui nuit considérablement à l'équilibre physiologique de la plante. Un phénomène similaire, mais inverse, se produit dans le cas de sols riches en magnésium, mais déficients en potassium : le magnésium absorbé en excès devient toxique.

Cet antagonisme, bien connu en Europe occidentale et en Amérique du Nord dès les années trente semble-t-il, fut largement étudié dans la zone intertropicale par un nombre considérable d'agronomes ; sans vouloir prétendre à une quelconque exhaustivité, illusoire en ce domaine, on peut citer notamment :

Ananas	Guinée	MARTIN-PREVEL (1962)
Bananier	Guinée	DUGAIN (1960-b) et MARTIN-PREVEL (1969)
	Côte d'Ivoire	DABIN et LENEUF (1960)
	Antilles	GUILLEMOT et *al.* (1973)
Caféier arabica	Zaïre	CULOT et VAN WAMBEKE (1958)
	Kenya	ROBINSON et CHENERY (1958)
	Costa Rica	CARJAVAL (1971)
Caféier robusta	Zaïre	FRANKART et GROEGAERT (1959)
	Rép. Centrafricaine	FORESTIER (1964)
	Côte d'Ivoire	LOUE (1957)
Canne à sucre	Guyanna	EVANS (1955) et JACK (1961)
Cotonnier	Côte d'Ivoire	DABIN (1956)
	Cameroun	FRITZ et VALLERIE (1971)
	Rép. Centrafricaine	DUBERNARD (1975)
	Brésil	MALAVOLTA et *al.* (1974)
Cocotier	Côte d'Ivoire	BRUNIN (1970), FREMOND et OUVRIER (1971)
Hévéa	Malaisie	BOLLES-JONES (1954)
Palmier à huile	Malaisie	COULTER et ROSENQUIST (1955), TURNER et BULL (1967)
	Indonésie	UNMAR AKBAR et *al.* (1976)
	Nigéria	TINKER et GUNN (1962), TINKER et SMILDE (1963), OLSON (1970)
	Congo	JULIA (1962)
	Côte d'Ivoire	OCHS (1968)
Tomates	Brésil (São-Paulo)	MALAVOLTA (1967)

Si le rapport Mg/K présente une rigidité certaine dans le végétal, les racines, elles, possèdent une sélectivité de fait au niveau des poils absorbants et pourront tolérer une certaine variabilité dans les concentrations respectives de ces deux éléments dans le sol, tout au moins entre certaines limites et ce sont ces limites qu'il appartient de définir.

Valeurs limites du rapport magnésium-potassium du sol admissibles pour certaines cultures

On s'est très vite aperçu que les carences en potassium et en magnésium des plantes n'étaient pas toujours imputables à un déficit absolu du sol en l'un ou l'autre de ces éléments, et qu'il fallait bien souvent incriminer un déséquilibre dans le sol de la balance

entre ces deux cations, tout au moins de leurs fractions échangeables. DUBERNARD (1975) établit d'ailleurs que les rendements en coton-graines sont significativement liés au rapport Mg/K dans les sols de la République Centrafricaine.

$$Y = 458 + 362\,Ca + 144\,Mg/K$$

On a reporté sur le tableau XI.2a. les résultats obtenus par quelques auteurs, à propos des limites inférieures et supérieures admissibles de ce rapport.

La grande variabilité des chiffres obtenus nécessite quelques précisions à titre de tentative d'explication. Tout d'abord, les teneurs respectives du sol en magnésium et potassium échangeables doivent être prises en considération : par exemple, les sols des Antilles sont largement pourvus en magnésium (nettement plus de 1 mé/100 g) et la plante, ici le bananier, espèce très sélective vis-à-vis d'un ion magnésium peu mobile et par ailleurs abondant, s'accommodera volontiers d'un rapport Mg/K légèrement supérieur à 2 (GUILLEMOT, LACHENAUD, DORMOY, 1973), alors qu'elle exige des proportions de 3 à 4 dans les sols désaturés de Côte d'Ivoire (DABIN et LENEUF, 1960).

Il en est de même pour le caféier canephora, variété Robusta, cultivé en République Centrafricaine, mais les comparaisons avec le bananier des Antilles s'avèrent délicates, l'auteur (FORESTIER, 1964) ayant surtout pris en compte la somme des bases échangeables.

TABLEAU XI.2a. — *Valeur du rapport magnésium-potassium pour quelques plantes des pays tropicaux*

Nature de la culture	Localisation	Mg/K seuil inférieur	Mg/K seuil supérieure	Auteurs
Ananas	Guinée	1	n.d.	PY (1965)
Bananier	Guinée	3	n.d.	DUGAIN (1960-a)
	Côte d'Ivoire	4	25	DABIN et LENEUF (1960)
	Antilles	2,0 avec Mg 1 me/100 g	3,7	GUILLEMOT et *al.* (1973)
Caféier Robusta	Rép. Centrafricaine	2,1 avec K<11 % SBE 3 avec K>11 % SBE	3,8 avec K 2,5 % SBE n.d. probablement élevé	FORESTIER (1964)
Caféier arabica	Zaïre (Kivu)	+ de 2,2	n.d.	CULOT et VAN WAMBEKE (1958)
	Costa Rica	n.d.	16,5 à 18	CARJAVAL (1972)
Cocotier	Côte d'Ivoire	n.d.	— de 20	FREMOND et OUVRIER (1971)
Cotonnier	Côte d'Ivoire	3	25	DABIN (1956)
	Cameroun	3	25	FRITZ et VALLERIE (1971)
Palmier à huile	Nigéria	3,0 à 3,5	n.d.	TINKER et SMILDE (1963)
	Congo	+ de 2	n.d.	JULIA (1962)

Les signes + et — indiquent que les seuils admissibles sont certainement supérieurs ou inférieurs aux chiffres qui les suivent, mais sans qu'il soit possible de présumer si ces seuils sont proches ou éloignés du chiffre qui suit.
n.d. non déterminé.

Il semble que l'on puisse, en première approximation, prendre 2 comme limite inférieure de Mg/K dans les sols convenablement pourvus en magnésium (plus de 1 milliéquivalent pour 100 g de terre), 3 pour les sols qui contiennent de 0,30 à 1 mé/100 g, et 3,5 à 4 pour les sols vraiment déficients en magnésium.

Quant à la limite supérieure, elle serait de l'ordre de 20 à 25 pour les sols assez bien pourvus en Mg et K, et se trouverait proche de l'optimum en sols très pauvres en ces éléments.

Quelques valeurs optimales du rapport magnésium-potassium

L'examen du tableau XI.2. permet de se rendre compte que des valeurs du rapport Mg/K de l'ordre de 3,5-4 et même un peu supérieures à ces chiffres paraissent tout à fait acceptables pour beaucoup de cultures.

TINKER et SMILDE (1963) constatent que, dès que ce rapport atteint 4 et lui est supérieur, il n'y a plus aucun risque de voir apparaître la maladie orangée des feuilles (« orange frond disease »), ceci dans les sols ferrallitiques sableux très pauvres du Nigéria méridional (0,08 à 0,06 mé/100 g de K, 0,06 mé/100 g de Mg avant apport d'amendements) (W.A.I.F.O.R., 1960-61).

Quant au caféier, qu'il s'agisse du Coffea arabica de Costa-Rica (CARJAVAL, 1972) ou du Coffea canephora, variété robusta de Centrafrique (FORESTIER, 1964 et 1968), l'optimum se trouve pour Mg/K = 3.

Le cas du bananier présente une exception, du moins dans les riches sols de la Martinique : l'optimum serait situé à Ca/K = 2,5, soit très près de la valeur minimale (MARTIN-PREVEL, 1969).

4.3. EQUILIBRE CALCIUM-POTASSIUM

En culture hydroponique, il est nécessaire de maintenir strictement un équilibre correct Ca-K, sinon l'absorption de l'azote par les racines se trouve fortement perturbée (MOLLE, 1957). Par contre, il apparaît d'après les travaux de GOUNY et PREVOT (1948) que les valeurs de cet équilibre peuvent varier sensiblement, au moins dans le cas de l'arachide qui supporte sans dommage un échelonnement du rapport Ca/K allant de 0,1 à 14 ; ces auteurs concluent qu'entre ces deux limites, l'antagonisme calcium-potassium n'est aucunement préjudiciable à cette plante.

Dans le sol, sauf exception, le calcium échangeable constitue normalement la part la plus importante des cations fixés sur le complexe absorbant ; aussi les agronomes se sont-ils surtout préoccupés du magnésium et du potassium, délaissant souvent le calcium. De ce fait, les équilibres entre calcium et potassium furent-ils assez peu étudiés. JULIA (1962) affirme qu'à Sibiti (Congo), une valeur de 5 est insuffisante pour le palmier à huile, qui ne passe cependant pas pour un gros consommateur de calcium, et CARJAVAL (1972) trouve qu'au Costa-Rica, l'optimum pour Coffea arabica se situe pour un rapport Ca/K de 6, bien que cette plante admette à la rigueur une plage de variation allant de 2 à 17 ; au-delà de 26, des carences potassiques se manifestent avec intensité.

Si l'on se réfère aux équilibres Ca/Mg et Mg/K répertoriés précédemment, on peut déduire que la valeur minimale du rapport Ca/K devrait être d'environ 4 et un bon équilibre se situerait entre 6 et 12.

4.4. EQUILIBRE GLOBAL CALCIUM-MAGNESIUM-POTASSIUM — LE RAPPORT Ca + Mg/K

La considération des équilibres entre les ions calcium, magnésium, potassium pris deux à deux a amené certains auteurs à grouper ces trois éléments en un équilibre unique.

Ainsi, AHMAD, TULLOCH-REID et DAVIS (1969) ont constaté que de fortes fumures potassiques apportées à un sol de la Trinidad, à peu près convenablement pourvu en potassium (0,15 mé/100 g de K), induisent non seulement une consommation de luxe de potassium, mais dépriment les teneurs en calcium et magnésium des feuilles de Digitaria. LOUE (1962) arrive à la même conclusion pour le Coffea canephora, variété robusta, cultivé sur les sols ferrallitiques très désaturés de Côte d'Ivoire.

Plus intéressants sont les travaux qui permettent de chiffrer cet équilibre global (tableau XII.2b.). Mais parfois, on fait mention en même temps de la teneur du sol en argile et limon, celle-ci conditionnant la vitesse de libération dans la solution du sol des éléments fixés sur le complexe absorbant (FORESTIER, 1964).

TABLEAU XI.2b. — *Valeurs du rapport calcium + magnésium/potassium pour quelques plantes tropicales*

Nature de la culture	Localisation	$\frac{Ca+Mg}{K}$ seuil minimum	$\frac{Ca+Mg}{K}$ seuil maximum	Auteur
Caféier robusta	République Centrafricaine			
Argile + Limon = 10 %		12	30	FORESTIER, 1964
Argile + Limon = 18 %		18	à	
Argile + Limon = 24 %		24	40	
Caféier arabica	Costa Rica	9	44 à 53 (23,5 seuil de réponse aux engrais K)	CARJAVAL, 1972
	Kenya	10	n.d.	MEHLICH cité par CARJAVAL, 1972
Cacaoyer Argile + Limon = 34 %	Brésil (Etat du Bahia)	13 à 15	> 30	OLIVEIRA-MORAIS et CABALA-ROSAND, 1971
Bananier	Côte d'Ivoire	n.d.	40 à 50	MARTIN-PREVEL, 1963
	Antilles	1,5*	n.d.	GUILLEMOT et *al.* 1973

* Il s'agit ici du rapport Ca/Mg + K et non du rapport Ca + Mg/K comme pour les autres auteurs.

Le petit nombre de résultats répertoriés sur le tableau ne permet pas de tirer une loi générale ; malgré tout, les publications de plusieurs auteurs autorisent à penser que ces chiffres sont en gros valables pour le caféier robusta en Côte d'Ivoire (LOUE, op. cit.), le caféier arabica au Kivu (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958), le cocotier en Côte d'Ivoire (FREMONT et OUVRIER, 1971), le palmier à huile en Nigéria (W.A.I.F.O.R., 1960-61), plusieurs plantes cultivées en Indonésie (MIDDELBURG, 1955).

Toutefois, TINKER (com. pers.), s'appuyant sur les travaux effectués au Nigéria sur palmier à huile , pense que le rôle principal, sinon unique, du calcium dans le sol est de neutraliser l'aluminium échangeable ; en conséquence, si l'on veut introduire un équilibre global entre les trois cations majeurs, il faut également y faire figurer l'aluminium, avec une relation du type défini par BECKETT (1964),

$$\frac{K}{\sqrt[2]{Ca} + Mg + p\sqrt[3]{Al}} \qquad \text{(TINKER, 1964)}$$

la constante p étant estimée à 2,5 pour les sols du Nigéria où sont cultivés les Elaeïs guineensis, et les symboles K, Ca, Al n'exprimant pas des milliéquivalents, mais l'« activité » de ces ions au sens indiqué par BECKETT (op. cit).

4.5. BALANCES CATIONIQUES DANS LES SOLS FERRALLITIQUES

Devant la complexité des actions entre cations majeurs du sol, un certain nombre d'auteurs se sont efforcés de définir les proportions de ces cations (Ca, Mg, K), sinon optimales, du moins satisfaisantes dans les sols tropicaux. Le tableau XI.3. en donne quelques exemples, avec, à titre de comparaison, ce qui est considéré comme optimum en France.

TABLEAU XI.3. — *Proportions respectives des cations majeurs considérés comme satisfaisantes dans quelques sols*

Culture (Type de sol)	Localisation	Ca	Mg	K	Auteur
		en % de la somme Ca + Mg + K			
Caféier arabica (sols ferrallitiques sur basate et sol colluvial)	Zaïre	75	18	7	CULOT et VAN WAMBEKE, 1958
Cultures diverses (sols ferrallitiques et hydromorphes)	Côte d'Ivoire	65	32	3	DABIN, 1970
Cacaoyer (sols ferrallitiques)	Côte d'Ivoire	64	31	5	JADIN, 1972
Cultures diverses (sols ferrallitiques)	Congo Gabon	63	29	8	MARTIN D., com. pers.
Toutes cultures (sols tempérés)	France	75-80	10-15	3-6	DUCHAUFOUR, 1965

Il apparaît donc que, dans une balance cationique convenable, le calcium forme entre les deux tiers et les trois quarts de la somme des bases échangeables, tandis que le magnésium est un peu inférieur à la moitié du calcium ; quant au potassium, il est compris entre 3 et 8 % de la somme Ca + Mg + K (ces pourcentages sont calculés à partir des éléments échangeables exprimés en milliéquivalents pour 100 g de sol).

Un examen de ce tableau fait apparaître les valeurs suivantes pour les équilibres précédemment étudiés :

$\frac{Ca}{Mg}$ entre 2 et 4 (sols de France vers 6-7)

$\frac{Mg}{K}$ entre 2,6 et 10 (sols de France vers 2-4)

$\frac{Ca + Mg}{K}$ entre 12 et 30 (sols de France entre 15 et 32)

On retombe donc « en gros » à l'intérieur des fourchettes précédemment définies lors de l'étude de ces rapports.

Il ne faudrait pas négliger, malgré tout, une donnée importante qui est la saturation du complexe absorbant (BEAR et TOTH, 1948). Dans les sols très désaturés (SBE/T inférieur à 10 %) des proportions équilibrées de Ca, Mg et K dans le sol ne signifieront pas forcément que la plante se trouve en conditions optimales : un pH trop acide et l'abondance d'aluminium échangeable peuvent handicaper fortement sa croissance ; en outre, il existe des teneurs « seuils » du sol en potassium en magnésium au-dessous desquelles l'alimentation en ces deux éléments est insuffisante dans tous les cas, comme on le verra au chapitre XII.

5. EQUILIBRES ENTRE CATIONS ET ANIONS

5.1. INTERACTION VRAIE CALCIUM-PHOSPHORE OU SYNERGIE APPARENTE ?

On a remarqué depuis longtemps, et des études récentes l'ont confirmé, qu'un apport de chaux ou de calcaire favorise l'assimilabilité du phosphore dans les sols acides et en particulier dans les sols ferrallitiques (STEPHENS, 1970-a ; MALAVOLTA, 1967 ; DELHAYE, 1970-a ; LE MARE, 1972, etc.), tandis que le degré de saturation en bases (calcium principalement) permet de prévoir le taux de disponibilité de cet anion (BIRCH, 1952, 1953 a, b, c ; BARROW, 1972).

Autre confirmation : le phosphore assimilable dit labile (ici mesuré par l'isotope radioactif 32 P) augmente proportionnellement à la dose de calcaire apporté dans les sols du Campo Cerrado brésilien (MALAVOLTA, CROCOMO et ANDRADE, 1964).

Il y a là toutes les caractéristiques d'une interaction Ca-P positive. Pourtant, on interprète généralement ce phénomène par trois séries de facteurs :

— la diminution et l'élimination de l'aluminium échangeable sous l'effet des amendements calcaires, ainsi que l'ont remarqué FOX et *al.* (1964) dans les latosols des Hawaï. En outre, comme on le verra plus loin, phosphore et aluminium d'une part, calcium et aluminium d'autre part, sont antagonistes, d'où des phénomènes connexes,

— la transformation des phosphates de fer peu assimilables en phosphates de calcium hautement assimilables à la suite du relèvement du pH et de l'augmentation des teneurs du sol en calcium,

— une augmentation de l'activité bactérienne (suite à la hausse du pH, elle-même conséquence de l'application de calcaire ou de dolomie) qui permet la libération du phosphore complexé à la matière organique.

Aussi, on conclut habituellement que les actions réciproques entre phosphore et calcium sont à classer dans les effets synergétiques indirects dûs surtout au pH et à l'aluminium échangeable.

5.2. SYNERGIE MAGNESIUM-PHOSPHORE

L'un des rôles du magnésium à l'intérieur du végétal est de favoriser l'assimilation et le transport du phosphore. Il est logique de penser que le sol doit contenir une quantité de magnésium en rapport avec les teneurs en phosphore assimilable pour que ce dernier soit utilisé correctement par la plupart des plantes ; et on a vérifié, sur solution nutritive, qu'un apport de magnésium provoque une substantielle augmentation de la nutrition phosphorique des petits pois (TRUOG et *al.*, 1947).

En ce qui concerne les sols, des mélanges de superphosphate et de serpentine broyée ont très nettement favorisé l'utilisation du phosphore par les cultures en Nouvelle-Zélande (ANDREW, 1942 ; ASKEW, 1942). La littérature agronomique ne présente que fort peu d'exemples d'une telle synergie dans les sols ferrallitiques. Mais on peut citer HOVELER (1973) qui accuse les déficiences en magnésium (et en potassium) dans les oxisols — cultivés en rizières inondées — de Colombie d'induire une absorption exagérée et toxique de phosphore.

5.3. EFFET SYNERGETIQUE ENTRE CALCIUM ET MAGNESIUM ET L'AZOTE DU SOL

On s'accorde à reconnaître qu'un taux d'azote convenable dans le sol n'a pas pour seul effet d'assurer une nourriture correcte de la plante en cet élément, mais qu'il améliore en même temps la nutrition calcique et magnésienne (FORESTIER et BELEY, 1969). Inversement, un apport de calcium dans les sols ferrallitiques à réaction pratiquement toujours acide induit presque toujours une meilleure alimentation nitrique. On a parfois voulu voir là une synergie calcium-azote (STEPHEN, 1967-a), mais, plus souvent, on invoque une action due au relèvement du pH, le calcium étant apporté comme amendement (calcaire, dolomie, chaux) et à la stimulation concommittante de l'activité bactérienne. DABIN (1961) a d'ailleurs basé une échelle de fertilité des sols de l'Afrique occidentale sur les teneurs en azote total et le pH, sans tenir compte des taux de calcium et de magnésium du sol en tant que tels.

En ce qui concerne le magnésium, WEIR (1969) a remarqué qu'un apport de kiéserite (SO_4Mg, H_2O) sur un sol portant des citrus à la Trinidad avait pour conséquence, non seulement une absorption supplémentaire — faible d'ailleurs — de magnésium, mais des teneurs croissantes des feuilles en azote, phénomène qui n'a rien à voir avec une augmentation quelconque du pH car le sulfate de magnésie est plutôt acidifiant. Il y aurait donc ici une véritable synergie N-Mg.

Lorsqu'il est nécessaire d'apporter une fumure magnésienne, on devrait donc, pour que celle-ci ait son plein effet, se préoccuper en même temps d'une fumure azotée. Ainsi, en République Centrafricaine, on préconisait, lors d'apport de magnésie sur Coffea canephora, variété Robusta (BORGET, DEUSS et FORESTIER, 1973), les proportions suivantes dans l'engrais :

$\frac{N}{MgO} = 1{,}25$ (rapport pondéral), cas courants,

$\frac{N}{MgO} = 0{,}6$ (rapport pondéral), en sols fortement déficients en Mg, sols argileux le plus souvent.

5.4. EQUILIBRE POTASSIUM-AZOTE

Un équilibre entre azote et potassium déjà présents dans le sol paraît difficile à mettre en évidence. Par contre, on a constaté des influences réciproques fort importantes entre ces deux éléments lors des fumures minérales.

En fait, les opinions sont très partagées en ce qui concerne les interactions entre fumures azotées et potassiques. Certes, on a décelé des antagonismes N-K [EVANS (1955) et JACK (1961) sur canne à sucre en Guyana ; FORESTIER et BELEY (1969) sur caféier en R.C.A. ; BELLIS (1970) sur hévéa en Malaisie], mais plus souvent, on a trouvé synergie ou interaction positive, qu'il s'agisse de sols ferrallitiques ou d'autres types de sols (1).

Des études sur solutions nutritives permettent de préciser, au moins partiellement, les causes de ces contradictions : MOLLE (1967) et JACQUINOT (1971) ont montré sur cultures hydroponiques que l'ion nitrate stimulait l'adsorption du potassium, tandis que l'ion ammonium la déprimait, l'optimum se situant pour un rapport $N\text{-}NO_3/N\text{-}NH_4$ voisin de 2 (JACQUINOT, op. cit.).

On peut rapprocher ce résultat du fait bien connu que l'ion ammonium se fixe fortement sur le complexe absorbant et y empêche la fixation du potassium, lequel est entraîné par les eaux de drainage et est alors inutilisé par les racines. On pourrait ajouter que l'ammonium provoque la fermeture des réseaux argileux empêchant toute sortie vers la solution du sol du potassium rétrogradé, si ce phénomène ne revêtait une importance minime ou nulle dans les sols ferrallitiques.

Il apparaît probable que, s'il y a synergie entre azote et potassium, celle-ci n'existe que lorsque l'azote se trouve sous forme de nitrate ; elle se transforme en antagonisme si l'azote est apporté en tant qu'ammonium. En pratique, il faut tenir compte de l'ambiance chaude et humide qui est celle des sols ferrallitiques, sinon toute l'année, du moins pendant la saison des cultures ; pour cette raison, urée et à plus forte raison ammonium se transforment en nitrates avec une extrême rapidité, moins de 48 heures en basse Côte d'Ivoire. L'antagonisme $K\text{-}NH_4$ a donc peu de temps pour se manifester.

Il est vraisemblable que le problème ne se réduit pas à des actions réciproques entre deux éléments pris deux à deux : ainsi pour MOLLE (1957), le rapport K/Ca aurait un rôle important dans l'alimentation nitrique des plantes, peut-être plus important que celui du potassium seul.

Quoi qu'il en soit, c'est à l'occasion des fumures minérales que synergies ou antagonismes (vrais ou apparents) entre azote et potassium se manifestent. Aussi, certains auteurs ont-ils défini des rapports à observer entre ces deux éléments dans les engrais. Ainsi $\frac{N}{K_2O} = 0{,}75$ (rapport pondéral) serait optimal pour les engrais appliqués à l'ananas au Cameroun (GAILLARD, 1970), tandis qu'en République Centrafricaine, on devrait moduler les proportions de la façon suivante pour la fumure minérale du Coffea canephora, variété robusta (BORGET, DEUSS, FORESTIER, 1963) :

$\frac{N}{K_2O} = 0{,}75$ pour compenser l'exportation de K,

$\frac{N}{K_2O} = 0{,}50$ s'il y a déficience du sol en K,

$\frac{N}{K_2O} = 0{,}35$ s'il y a carence nette du sol en K.

---

(1) On peut citer en particulier les travaux suivants concernant l'Afrique : CULOT et VAN WAMBEKE (1968), caféier Arabica, Zaïre ; FAO (1963), cultures vivrières, Afrique de l'Ouest ; AMON (1965), manioc, sud du Nigéria ; SEITZER et *al.* (1970), blé, Kenya ; HEATHCOTE et STOCKINGER (1970) et HEATHCOTE (1971), arachide, nord du Nigéria.

On préconise des valeurs similaires pour le bananier à Taïwan (YANG et PAO, 1962) ($N/K_2O = 0{,}50$ à $0{,}33$).

5.5. EQUILIBRE PHOSPHORE-POTASSIUM – SYNERGIE OU ANTAGONISME ?

Etudiant l'effet d'engrais phosphoriques sur des cacaoyers en sol ferrallitiques moyennement désaturé – et carencé en phosphore – de Côte d'Ivoire, VERLIERE (1969) constate qu'un apport de phosphate bicalcique déprime l'alimentation potassique de cet arbuste au point même d'en arriver à une carence en potassium. Il y aurait donc là un antagonisme net entre P et K. Or, dans la pratique courante, ce sont les associations d'engrais potassiques et phosphoriques qui donnent les meilleurs résultats.

Effet d'une synergie ou antagonisme P-K aboutissant à une meilleure régulation de l'alimentation en potassium et phosphore des plantes ? Il est difficile de trancher.

On a vérifié ces actions réciproques entre phosphore et potassium en sols ferrallitiques certes (AMON, 1965 sur maïs et manioc au Nigéria ; CHOW, 1966 sur ananas à Formose, etc.), mais peut-être plus souvent encore en sols sableux pauvres en éléments minéraux (sols de dunes « Pettasachs » aux Indes et sables côtiers en Côte d'Ivoire ; sols « Dior » du Sénégal ; sols sableux du nord du Nigéria, etc.).

Bien que les effets, favorables ou défavorables, de l'équilibre K-P ne se manifestent guère qu'à l'occasion des fumures minérales, on s'est apparemment peu préoccupé d'une balance K-P dans les engrais ; généralement, on préconise globalement N.P.K. entre certaines proportions (ce qui n'est pas tout à fait la même chose, N intervenant avec l'ensemble P-K et non plus avec K seul).

6. EQUILIBRES ENTRE ÉLÉMENTS MAJEURS ET OLIGO-ÉLÉMENTS

6.1. ROLE DU pH

Le pH du sol a une importance déterminante sur l'assimilabilité de nombreux oligo-éléments. Bien que les teneurs en magnésium et surtout en calcium interviennent dans la saturation du complexe absorbant et donc sur la réaction du sol, il est impossible de parler ici d'antagonismes et de synergies. Cela paraît évident dans le cas du cuivre et du zinc dont les carences, lorsqu'elles apparaissent après chaulage, sont beaucoup plus à mettre sur le compte du pH que d'un antagonisme avec le calcium.

Toutefois, il existe des cas où les phénomènes d'équilibre jouent un rôle relativement indépendant du pH (dans le cas du potassium, cette incertitude n'existe pas, cet élément étant sans action sur le pH aux teneurs habituelles du sol).

6.2. ANTAGONISME CALCIUM-ALUMINIUM

Lorsqu'il fut question plus haut des effets apparents de synergie entre calcium et phosphore, on a vu que ces processus dépendaient souvent d'une stimulation de l'alimentation

phosphorique par diminution puis élimination de l'aluminium échangeable par le calcium. L'exemple donné par FOX et *al.* (1964) pour les latosols des Hawaï se révèle particulièrement significatif, puisqu'il n'y a pas dans ce cas relèvement du pH à la suite du chaulage.

L'aluminium échangeable présente en effet un antagonisme net avec le calcium qu'il empêche de traverser les membranes absorbantes des radicelles et inversement (BROWN et FOY, 1964 ; DELHAYE, 1970 ; KAMPRATH, 1972). Mais il peut aussi exister très souvent des effets complémentaires dûs à la suppression de l'antagonisme P-Al ou au relèvement du pH s'il y a apport massif de calcaire ou de dolomie.

6.3. ANTAGONISME DU CALCIUM ET DU MAGNESIUM AVEC LE MANGANESE

Un apport de calcaire et de dolomie réduit et même supprime les toxicités manganiques ; on attribue généralement cet effet au relèvement du pH, le manganèse divalent hautement assimilable ayant tendance alors à se transformer en manganèse tétravalent peu soluble. Il n'existe pratiquement plus d'effet nocif du manganèse pour des pH égaux ou supérieurs à 5,5, sauf, bien sûr, dans quelques sols à teneurs anormalement élevées en cet élément.

Pourtant, il semble bien que l'on ait vérifié à Madagascar en sols ferrallitiques fortement désaturés l'existence d'un véritable antagonisme calcium-manganèse ici sans relèvement du pH (IRAT, 1973) ; à la limite, cet antagonisme induit des carences manganiques, comme sur cacaoyer au Ghana, mais cette fois avec une réaction du sol neutre ou légèrement alcaline normalement bien supportée par cette plante (CUNNINGHAM, 1964).

Pour d'autres auteurs, l'antagonisme magnésium-manganèse serait le moyen le plus efficace de réduire la nocivité du manganèse ; c'est le cas par exemple des hévéas plantés dans les latosols acides de Malaisie (BOLLE-JONES, 1957-b ; BOLTON et SHORROCKS, 1961 ; COULTER, 1972).

Cette opinion n'est pas partagée par tous dans tous les cas : ainsi, LEVEQUE et BELLEY (1959) ont observé qu'en solution nutritive, l'absorption du manganèse par l'arachide est stimulée par le magnésium. Sans doute faut-il faire la part des conditions expérimentales, comme l'ont montré AGBOOLA et COREY (1973) sur maïs dans les sols du Nigéria occidental : on y constate normalement une corrélation négative entre le manganèse contenu dans les tissus du maïs et les teneurs en magnésium échangeable du sol ; mais si, pour une raison ou une autre, la concentration en magnésium augmente à l'intérieur de la plante, cette corrélation devient positive.

Il est très probable qu'on a affaire ici à un mécanisme de régulation par antagonisme Mg-Mn qui fonctionne correctement uniquement tant que les taux des éléments dans le sol et la plante se trouvent à des niveaux « normaux ».

6.4. SYNERGIE CALCIUM-MOLYBDENE

Il est bien connu qu'un relèvement du pH du sol par des amendements calcaires ou calco-magnésiens accroît la disponibilité du molybdène pour les cultures. Mais on sait aussi qu'un apport de molybdène accroît l'absorption du calcium, en particulier par les légumineuses.

Cette réciprocité paraît le type même d'une réaction synergique ; FORSTER (1970) a constaté que l'arachide « répondait » très favorablement au chaulage sur des sols de l'Ouganda, bien fournis en calcium échangeable (6 mé/100 g), à pH en principe favorable à l'arachide (pH 5,8), mais connus pour être déficients en molybdène ; il attribuait à cet

effet favorable à une meilleure disponibilité du molybdène grâce à une quantité supplémentaire de calcium plus qu'à un relèvement du pH (assez faible vu l'apport minime de calcaire) induit par le chaulage.

Il est évidemment assez difficile de déterminer la part qui revient à chacun des facteurs, pH et calcium, lors d'applications, même modérées, d'amendements calciques ou calco-magnésiens, d'autant plus que, très vraisemblablement, d'autres facteurs interviennent alors : ainsi BIRCH (1960) a reconnu que dans les Highlands du Kenya, il fallait à la fois ajouter au sol chaux et molybdène pour accroître la teneur en molybdène de la luzerne ; cela pourrait indiquer un sol naturellement déficient en cet élément. Mais alors comment expliquer que la plus forte fumure molybdique, pourtant modeste en quantité (un peu plus de 3 kg/ha de molybdate), ait eu un effet dépressif !!

6.5. ANTAGONISME POTASSIUM-MANGANESE

En ce qui concerne l'absorption du manganèse par la pomme de terre, BOLLE-JONES (1955) avait constaté que le potassium réduisait la concentration du manganèse dans la racine, mais qu'il n'avait pas d'influence notable sur l'ensemble de la nutrition manganique de cette plante.

Travaillant cette fois sur une majorité de sols ferrallitiques du sud-ouest du Nigéria, AGBOOLA et COREY (1973) ont mis, par contre, en évidence un accroissement de la teneur en manganèse des tissus de maïs par la fumure potassique. Il semblerait effectivement comme l'ont montré KHAN, AHMED et AKUTAR (1976) dans des sols de rizières qu'une application de chlorure de potassium libère du manganèse assimilable.

Ces deux derniers exemples soulignent bien la difficulté et la complexité d'une telle étude :

— tout d'abord, un antagonisme dans le sol peut fort bien se transformer en synergie pour la plante,

— l'application d'une fumure potassique à base de KCl n'est pas sans effet sur l'ensemble du sol ; elle peut engendrer une légère acidification, donc favoriser la formation de manganèse assimilable.

Enfin, il faut ajouter que le potassium est antagoniste du calcium et du magnésium, cations généralement beaucoup plus abondants que lui et dont on a vu précédemment qu'ils avaient une action sur le manganèse.

Toutefois, CULOT et VAN WAMBEKE (1958) ont bien noté qu'indépendamment de toutes considérations de pH dans les sols chimiquement très riches du Kiwu, les troubles physiologiques du caféier arabica dûs à une insuffisance de nutrition manganique survenaient précisément aux endroits qui possédaient les plus fortes teneurs en potassium échangeable. Ces troubles ne sont souvent décelables qu'à l'analyse folliaire, car cet excès de potassium échangeable entraîne le plus souvent en premier lieu un déséquilibre du rapport Mg/K avec des manifestations, elles, bien visibles sur l'état sanitaire de la plante.

L'antagonisme Potassium-Manganèse semble donc bien prouvé, quoique pas toujours facile à mettre en évidence.

6.6. ANTAGONISME POTASSIUM-MOLYBDENE

On a constaté en Australie (ROSSITER, 1952) qu'il existait un antagonisme entre molybdène et potassium du sol, antagonisme qui joue surtout dans les sols acides, désaturés. Mais, dès qu'il y a chaulage, il ne se manifeste plus guère (DAVIES, 1956).

Il ne semble pas que des observations similaires aient été faites dans les sols ferrallitiques pourtant parfois très acides et très désaturés ; il est vrai que d'autres problèmes plus aigus accaparent alors l'attention des agronomes (pH, Al^{+++}, etc.).

6.7. ANTAGONISME OU SYNERGIE POTASSIUM-FER

Depuis longtemps on avait perçu que les sols déficients en potasse portaient des cultures carencées en fer. En fait, dans ce cas, le fer pénètre bien dans les racines, mais il s'y accumule sans migrer vers les parties aériennes, les feuilles surtout. Pour qu'il le fasse, il faut que du potassium soit présent. On a donc là toutes les caractéristiques d'une synergie, conception reprise par OERTLI et OPOLU (1974) à propos de cultures sur solution nutritive.

Pourtant, actuellement, on tend à voir, dans cette action du potassium sur le fer, un antagonisme K-Fe plus qu'une synergie ; en effet, en l'absence de l'un de ces deux éléments, la plante se gorge de l'autre qui devient alors toxique : le fer étant généralement abondant dans les sols ferrallitiques, c'est lui qui s'accumulera, le cas échéant, dans les racines. Et ce sont surtout les sols en état d'hydromorphie qui présenteront ces accidents du fait d'une meilleure solubilité du fer réduit : sols hydromorphes au Japon (TANAKA, 1972), oxisols traités en rizières inondées en Colombie (HOVELER, 1973), etc.

Mais les sols bien drainés ne sont pas automatiquement indemnes : ROBINSON et CHENERY (1958) ont remarqué qu'un mulch abondant peut induire une chlorose ferrique chez les caféiers robusta et arabica au Kenya, en raison de l'apport de la potasse contenue dans les végétaux (1) ; en général, cette chlorose est fugitive, sauf s'il y a des gros apports organiques (mulch de pennisetum, parches de café, ...) riches en potassium.

Synergie ou antagonisme ? La querelle peut sembler académique ! Retenons surtout l'opinion de FORESTIER et BELEY (1969) : une bonne alimentation en potasse conditionne une bonne alimentation en fer et réciproquement.

6.8. SYNERGIE OU ANTAGONISME POTASSIUM-CHLORE ?

On a remarqué depuis un certain temps que la forme de l'anion n'était pas toujours indifférente pour les engrais potassiques. C'est ainsi que le chlorure de potassium diminue la qualité commerciale de l'ananas et du tabac au contraire du sulfate de potasse (BOYER, 1973), ceci étant dû à l'action du chlore.

De fait, MARTENS et ARNY (1967) ont rapporté que, sur des sols des Etats-Unis, le chlorure de potassium avait très nettement amélioré l'état sanitaire d'un maïs (affecté par la pourriture des racines et de la moëlle) et que cet effet ne paraissait pas uniquement dû au potassium ; effectivement, une fumure à base de chlorure d'ammonium a donné une amélioration similaire bien que d'intensité moindre.

L'intérêt d'une fumure potassique à base de chlorure de potassium est bien connue pour le cocotier (VON HUEXKÜLL, 1972 ; DANIEL et MANCIOT, 1973), mais cela n'a rien d'étonnant étant donné l'avidité notoire de cet arbre pour le chlore. Plus significatif est le cas du palmier à huile (Elaeïs guineensis) poussant dans un sol alluvial de Colombie apparemment en voie de ferrallitisation : dans ce sol relativement riche en bases, il existe une interaction négative, constatée lors des essais d'engrais, entre chlore et potassium. En effet,

---

(1) Pour la même raison, excès de potassium, le mulch peut provoquer une carence magnésienne chez ces caféiers. Si on rapproche ces deux accidents (carence en Fe et Mg), de la carence manganique déclenchée au Kivu sur arabica (ch... g...) par un mulch, cela fait beaucoup d'inconvénients possibles pour l'opération en principe toujours bénéfique qu'est l'apport de matières organiques !!!

un apport de chlorure de potasse, s'il élève fortement les teneurs en chlore des feuilles, déprime celles de potassium (OLLAGNIER et OCHS, 1971).

Discutée par certains (TINKER, com. pers.), cette interaction fut trop peu fréquemment mise en évidence pour être encore bien définie. Disons simplement pour conclure qu'elle ressemble plus à un antagonisme de régulation qu'à une synergie.

6.9. ANTAGONISMES ENTRES LES CATIONS MAJEURS – CALCIUM, MAGNESIUM ET POTASSIUM – ET CERTAINS OLIGO-ELEMENTS (CUIVRE, ZINC PRINCIPALEMENT)

Lors des opérations de chaulage, il est fréquent de constater une nette diminution de l'assimilabilité du cuivre, du zinc ; on interprète généralement ce phénomène par le relèvement du pH (chapitre X, p. 227) à la suite de l'apport de calcaire ou de dolomie.

Mais il y a sans doute des effets plus complexes. En effet, il est patent que le *zinc* est adsorbé très énergiquement à la surface des cristaux de magnésie et de dolomie (plus faiblement s'il s'agit de calcite) sur des sites normalement occupés par le magnésium, grâce à la similitude des rayons ioniques (1) (JURINAK et BAUER, 1956). De telle sorte que des fumures magnésiennes font augmenter les taux de zinc dans les feuilles d'aleurites de Floride, tandis que des applications de zinc ont aussi pour effet de relever les teneurs en magnésium des feuilles (MERRILL et *al.*, cités par THORNE, 1957).

Constatation analogue faite sur citrus à la Trinidad par WEIR (1969) : un apport de kiesérite (SO_4Mg, H_2O) favorise l'absorption du zinc du sol, mais déprime celle du cuivre ; en outre, une fumure potassique – ici du chlorure de potassium – provoque une diminution de l'alimentation en zinc.

En ce qui concerne le *cuivre*, DROUINEAU et MAZOYER (1962) remarquent que cet élément, s'il est présent à doses toxiques dans les sols de France, inhibe l'absorption du potassium par la plante. Pour de nombreux auteurs (GANIRON et *al.*, 1959 ; WEIR, op. cit.), il s'agit là de véritables antagonismes au niveau des racines.

A titre de commentaires et d'explications, il paraît opportun de rappeler ici les expériences de CHAUDRY et LONERAGAN (1972) sur solution nutritive concernant l'assimilabilité du zinc ; ces auteurs se sont aperçus que l'absorption de zinc par les racines de blé est inhibée par la plupart des cations pris isolément (NH_4, Rb, K, Cs, Ca, Mg, Na, Li, Ba...), mais que l'efficacité du blocage du zinc par chacun de ces cations varie avec la concentration en calcium du milieu (à noter que les anions associés n'ont aucune action, ni positive, ni négative) : ainsi, l'inhibition de l'absorption du zinc par le potassium, très forte aux plus faibles concentrations de calcium, diminue progressivement si on augmente la teneur en calcium et, enfin, disparaît aux plus fortes concentrations de cet élément ; elle est alors remplacée par une inhibition due au calcium par antagonisme Ca-Zn (ou par la formation d'un zincate de calcium peu soluble vers pH 7, chap. X, p. 227).

Le calcium joue apparemment un rôle similaire à l'égard du cuivre : en solution nutritive, ce dernier élément ne présente aucune toxicité pour la plante, même à concentration élevée, tant que le calcium est présent aux teneurs habituelles de la solution du sol. Le calcium aurait donc un rôle régulateur important dans l'alimentation en cuivre et en zinc des plantes.

Parmi les oligo-éléments, le cuivre est le seul qui semble capable, dans le sol, d'inhiber l'ingestion du zinc par la plante (le cobalt aurait sans doute une action similaire mais bien plus faibles). On verra plus loin qu'il existe un antagonisme Cu-Zn.

---

(1) Pour cette raison, le zinc pourrait se substituer au magnésium à l'intérieur des réseaux des smectites magnésiennes (EL GABALY, 1950) et s'y insolubiliser. Ces argiles étant pratiquement absentes des sols ferrallitiques, cette réaction est rappelée ici pour mémoire.

Ces développements, peut-être un peu fastidieux, sont donnés ici afin de montrer toute la complexité d'un problème, apparemment simple, dont on arrive encore fort insuffisamment à voir toutes les imbrications : les actions entre Cu, Zn, Ca, Mg, K, se mélangent de telle façon qu'on voit mal quelle conclusion définitive il est possible de tirer.

6.10. ANTAGONIQME POTASSIUM-BORE

Les actions réciproques du bore et du potassium sont connues depuis longtemps dans les sols tempérés avec d'ailleurs des effets contradictoires — parfois antagonistes, parfois synergiques — suivant les teneurs en bore du sol (REEVE et SHIVE, 1944 ; OERTLI, 1961 ; OUELETTE, 1961).

Qu'il s'agisse des sols à cotonniers de l'Arkansas (MILEY et *al.*, 1969) ou des sols ferrugineux tropicaux du nord du Nigéria, également cultivés en cotonniers (HEATHCOTE et SMITHSON, 1974), tous sols carencés en bore, on constate que l'effet du borate seul sur le sol est nul ; mais s'il est accompagné de chlorure de potassium, il provoque de substantielles augmentations de rendements.

En sol ferrallitique, QUILLON (1967) et RAJARATNAM (1973-a) ont signalé des carences en bore sur palmier à huile induites par une fumure potassique respectivement au Cameroun et en Malaisie ; RAJARATNAM (op. cit.) précise que cet antagonisme dû à un excès de potassium a lieu, non seulement, au niveau des racines, mais aussi à l'intérieur du végétal.

Ces carences en bore se produisent surtout en sols sableux, sols qui sont généralement les plus mal pourvus en cet élément. Mais il faut penser à une carence du type antagonisme lorsque l'on constate des accidents végétatifs aux endroits où des cendres végétales se sont accumulées lors du brûlis de la végétation primitive ou encore après une forte fumure potassique de redressement.

6.11. ANTAGONISME AZOTE-BORE

Si l'existence de l'antagonisme Potassium-Bore est bien connue, il n'en est pas de même de l'antagonisme Azote-Bore. Celui-ci apparaît, en ce qui concerne les cultures de type tropical, dans une publication de MILEY et *al.* (1969) consacrée à la nutrition du cotonnier dans un limon sableux de l'Arkansas. Dans ce sol, d'ailleurs faiblement alcalin (pH = 7,3), les engrais azotés augmentent la fréquence (ou font apparaître) des anneaux bruns sur le pétiole des feuilles, symptômes considérés comme caractéristiques d'une carence en bore ; et sur une plante non carencée en bore, l'application de borate fait diminuer la teneur en azote des feuilles.

A l'appui de cette observation, FRITZ (1971) a remarqué que les fumures azotées mises sur cotonnier dans le nord-Cameroun dépriment les teneurs en bore des feuilles, mais ici sans aller jusqu'à la carence — puisque les rendements en coton-graine ne sont pas affectés. Il en est de même dans le nord du Nigéria (Samaru) où l'azote seul déprime les rendements en coton-graine, mais les accroît en présence de Bore ; le bore seul a peu d'effet, mais donne sa pleine efficacité en présence d'azote (tableau XI.4.).

Malgré une allure de synergie, on a donc affaire ici à un typique antagonisme de régulation. Ces trois exemples ne portent pas sur des sols ferrallitiques, mais sur des sols de zones semi-arides, sableux et à réaction tendant vers la neutralité, sinon alcalins, donc sols présumés pauvres en bore et en bore disponible.

Les sols ferrallitiques seront sans doute moins sensibles car le plus souvent acides. Toutefois, de tels accidents — carences en bore à la suite de fumures azotées — sont susceptibles de survenir au moins sur les plus sableux d'entre eux.

TABLEAU XI.4. – *Rendements en coton-graine (Kg/ha) avec une fumure combinée Azote-Bore à Samaru (Nord-Nigéria) d'après* HEATHCOTE *et* SMITHSON *(1974)*

	1971		1972	
	N_0	N_1	N_0	N_1
B_0	1 011	797	1 370	1 072
B_1	1 037	1 405	1 429	2 168

6.12. SYNERGIE PHOSPHORE-MANGANESE

Déjà CHENERY (1955) avait remarqué au Tanganika que la présence de fortes quantités de manganèse assimilable dans le sol stimulait l'alimentation phosphorique du théier. Ce phénomène n'est d'ailleurs pas propre aux sols ferrallitiques puisque JUSTE (1970) le mentionne pour des sols de France ; d'autre part, la réciproque, augmentation de la toxicité manganique par des apports de superphosphate triple est bien démontrée par des travaux, tant canadiens (CHENG et OUELETTE, 1971) qu'australiens (TRUONG, WILSON et ANDREW, 1971), ces derniers portant, en partie, sur des sols vraisemblablement voisins des ferrallitiques.

On peut également faire un rapprochement avec de prétendus cas de toxicité des engrais phosphoriques (en réalité des intoxications manganiques), assez souvent rapportés dans la littérature agronomique, par exemple ceux notés sur trèfle souterrain en Australie (ROSSITER, 1951 et 1955), sur lupin jaune en Angleterre (WARREN et BENZIAN, 1959) et sur maïs dans les Landes en France (ROUTCHENKO et DELMAS, 1963). Le domaine ferrallitique ne fait pas exception : STEPHENS (1966) observe un effet toxique du superphosphate triple sur cotonnier en Ouganda, tandis que COELHO et VERLENGIA signalent des accidents analogues survenus après apport de phosphate diammonique sur céréales et pommes de terre dans le sud du Brésil ; ils ajoutent que des toxicités similaires, attribuées ici à l'effet acidifiant du phosphate diammonique, ne sont pas rares dans les cultures maraîchères après de très fortes fumures minérales NPK.

BOYER (1980) a souligné un point commun à tous les phénomènes de toxicité énumérés ci-dessus : ils se produisent dans les sols acides, pH $\leqslant 5{,}0$, pauvres en calcium échangeable et surviennent à la suite de l'utilisation de superphosphate triple et de phosphate d'ammoniaque, jamais avec du phosphate tricalcique ou des superphosphates peu enrichis.

Depuis le début du siècle, on avait pressenti une synergie entre phosphore et manganèse assimilable du sol et les travaux cités plus haut ont depuis prouvé sa réalité. Cette synergie se révèle capable d'induire des toxicités manganiques après application d'engrais phosphatés. Suivant les expérimentateurs on a obtenu des résultats très divers, soit favorables, soit nuls, soit au contraire catastrophiques avec cette fumure.

C'est à LE MARE (1977, a, b, c) que revient le mérite d'avoir éclairé cette contradiction par des travaux faits sur les sols de l'Ouganda. D'après cet auteur, les effets néfastes de cette synergie se produisent avec intensité, surtout dans les sols acides. Pour les éviter, il suffira d'apporter du calcium qui est l'antidote bien connu du manganèse. Les formes d'apport du calcium et du phosphore n'ont aucune importance à condition qu'il y ait plus d'atomes de calcium que de phosphore, ou à la rigueur le même nombre (LE MARE, op. cit.) $\frac{Ca}{P}$ (molaire) $\geqslant 1$.

On s'explique alors pourquoi les toxicités attribuées aux engrais phosphoriques — en fait dues à la synergie phosphore-manganèse — apparaîtront en sol acide (donc mal pourvus en calcium) lors d'application de phosphate d'ammoniaque ($\frac{Ca}{P} = 0$), de superphosphate triple — dit encore enrichi — ou de phosphate d'alumine ($\frac{Ca}{P} < 1$). On ne les constatera pas avec les phosphates tricalciques et les superphosphates simples ($\frac{Ca}{P} > 1$) et rarement avec le phosphate bicalcique ($\frac{Ca}{P} = 1$) quel que soit le sol.

Un chaulage préalable peut, bien sûr, compenser l'excès de phosphore (par rapport au calcium) d'un phosphate très concentré en P_2O_5.

6.13. ANTAGONISME OU SYNERGIE PHOSPHORE-ALUMINIUM

On a démontré, tant en solution nutritive que dans les sols de la frange subtropicale des Etats-Unis (FOY et BROWN, 1964), que les toxicités aluminiques peuvent être éliminées soit par chaulage, soit par apport de phosphore. Effectivement, le phosphore précipite l'aluminium échangeable du sol, réduisant ainsi ses effets toxiques (KAMPRATH, 1972 ; SEGALEN, 1973 ; TRINTH, 1976). Il y a donc un antagonisme ici bien apparent, que confirment, s'il en était besoin, ROCHE et *al.* (1978).

En fait, le processus apparaît nettement plus complexe : on a remarqué, déjà depuis les années 1920 avec de nombreuses confirmations depuis lors (divers auteurs, surtout américains, cités par JUSTE, 1964), que la présence d'une certaine quantité d'aluminium ionique, plus souvent appelé échangeable suivant la terminologie anglo-saxone, bouleverse la nutrition phosphorique de la plante en l'augmentant très nettement. En fait, ce phosphore absorbé avec une telle abondance reste dans les racines où il s'immobilise sous forme de phosphate d'alumine ; le phosphore ne semble, en présence d'aluminium, que très peu ou pas du tout migrer dans le reste de la plante et en tout cas il y est fort mal utilisé (ANDREW et VAN DENBERG, 1973 ; FOY, 1974). Il existerait donc entre phosphore et aluminium un antagonisme dans le sol, une synergie au niveau des radicelles absorbantes de la plante, un antagonisme dans le reste du végétal.

Du point de vue de l'agriculteur, une plante intoxiquée par l'aluminium échangeable souffre de façon très apparente d'une carence en phosphore. Réciproquement, on peut réduire les toxicités aluminiques par apport de phosphate au sol. En pratique, l'action n'est probablement pas aussi simple que les considérations précédentes pourraient le laisser penser, car les formules les plus économiques d'amendements phosphoriques sont à base de phosphate tricalcique et de scories de déphosphoration. Il s'ajoute donc une action du calcium par antagonisme Ca-Al, sans relèvement du pH s'il s'agit du phosphate, avec relèvement du pH pour les scories ; dans le deuxième cas, le radical silicate a, en plus, un effet propre en stimulant l'absorption du phosphore du fait de la synergie P-Si. Malheureusement, le phosphore réagit aussi sur les hydroxydes libres — et inoffensifs — du sol, d'où l'obligation de forcer les apports pour qu'il en reste assez pour neutraliser l'aluminium échangeable (BOYER, 1976).

Quoiqu'il en soit, les amendements phosphatés sont trop onéreux pour être utilisés seuls dans l'élimination de l'aluminium échangeable. En pratique, on commence par bloquer l'aluminium grâce à un chaulage pour permettre une utilisation correcte par la plante et du phosphore du sol et du phosphore des engrais.

6.14. SYNERGIE PHOSPHORE-MOLYBDENE ET ANTAGONISME SOUFRE-MOLYBDENE OU COMPETITION ENTRE CES IONS ?

Des travaux, principalement américains (STOUT et *al.*, 1951 ; DAVIES, 1956), ont montré que l'ion PO_4^{---} accroît l'assimilabilité du molybdène, tandis que l'ion SO_4^{--} la diminue. MALAVOLTA (1976) a repris ces conclusions pour les appliquer aux sols du Brésil.

Plus que de synergie ou d'antagonisme, il semble qu'il soit préférable d'envisager ici une compétition entre ions molybdates d'une part, ions phosphates et sulfates d'autre part. En effet, PO_4^{---} se fixe sur les mêmes sites d'échange à la surface des feuillets d'argile que MoO_4^{--} et, en le déplaçant, accroît sa disponibilité pour les plantes ; au contraire, SO_4^{--} gêne l'assimilation du molybdène en neutralisant sur les racines les points où MoO_4^{--} pourrait se fixer et être absorbé (1). On peut ajouter que l'anion sulfate est rarement assez abondant dans la solution du sol pour provoquer une indisponibilité totale du molybdène. A la rigueur, cela pourrait survenir passagèrement lors de fortes applications de sulfate d'ammoniaque et, dans ce cas, l'antagonisme SO_4-MoO_4, s'il existe, joue dans le même sens que la diminution d'assimilabilité du molybdène engendrée par la baisse de pH due à l'apport de sulfate d'ammoniaque.

Une fois de plus, il s'agit donc d'un phénomène complexe dont il est bien difficile de déterminer la part qui revient à chacun des facteurs composants.

6.15. ANTAGONISME ENTRE LE PHOSPHORE ET CERTAINS OLIGO-ELEMENTS (BORE, CUIVRE, ZINC)

Les premiers à avoir précisé l'existence d'un antagonisme entre phosphore et *zinc* furent, semble-t-il, BURLESON, DACUS et GERARD (cités par GANIRON et *al.*, 1969). Déjà BINGHAM et *al.* (1958) avaient remarqué que, dans les sols de Californie, une forte fumure phosphatée à base de phosphate manocalcique provoquait des baisses des taux de *Bore, Cuivre* et *zinc* dans les feuilles des jeunes citrus. Un peu plus tard, OLSON et ENGELSTAD (1972) ne voyaient aucune impossibilité à l'apparition de carence en zinc, à la suite d'un apport de phosphate, dans les sols des régions tropicales les moins bien pourvus.

En ce qui concerne le zinc, on a voulu voir là plus un effet de l'action du calcium contenu dans le phosphate que du phosphore (CHAUDRY et LONEREGAN, 1972). Toutefois, MALAVOLTA (1967 et 1976) rapporte qu'à la suite d'une forte fumure phosphorique, l'analyse folgiaire a révélé des chutes nettes des teneurs en cuivre et en zinc dans les feuilles des caféiers de l'Etat de São Paulo (Brésil) ; or ce phénomène est indépendant de la présence du calcium dans l'engrais, car il se produit même avec du phosphate d'ammoniaque.

Des constatations de ce genre furent faites, à propos du *cuivre*, sur blé poussant dans les Highlands du Kenya (MULAMULA, 1972) et sur l'assimilabilité du *cuivre* et du *zinc* dans des sols de l'Inde (HULAGUR, DANGARMA, MEHTA, 1975). En Malaisie, après une fumure phosphatée de redressement, on ajoute SO_4Zn pour éviter une carence en zinc (CUNARD, LEE CHON SOON, 1973).

En conclusion, il apparaît qu'une fumure phosphorique un peu forte risque de provoquer des carences en cuivre et zinc dans les sols les plus mal pourvus en ces deux éléments ou dans les sols fortement organiques où ces métaux sont peu disponibles pour les plantes.

---

(1) Il s'agit ici de deux antagonismes avec le molybdène (PO_4-Mo et SO_4-Mo) mais les conséquences sur la mise à la disponibilité du Molybdène pour les plantes en sont radicalement opposées.

7. EQUILIBRES ENTRE OLIGO-ÉLÉMENTS

7.1. SYNERGIE ALUMINIUM-MANGANESE ET ANTAGONISME ALUMINIUM-CUIVRE

L'aluminium échangeable semble peu nocif par lui-même pour les plantes cultivées, car il agit surtout de façon indirecte (SEGALEN, 1973). On a vu précédemment qu'il bloquait à l'intérieur des racines le phosphore absorbé, empêchant le reste du végétal d'en profiter ; en outre, il exerce une influence notable sur l'absorption par la plante du cuivre et du calcium à partir du sol.

Il déploie en effet à l'encontre du *cuivre* un antagonisme net (BROWN et FOY, 1964). Aux pH auxquels se développe l'aluminium échangeable, qui sont aussi ceux pour lesquels le cuivre présente un maximum d'assimilabilité, cet antagonisme peut être bénéfique en réduisant la toxicité du cuivre dans les sols un peu trop abondamment fournis en cet élément, mais « a contrario » il peut provoquer de sévères carences dans les sols mal pourvus.

Avec le *manganèse*, beaucoup plus fréquente et redoutable est la synergie que l'on constate entre Aluminium et Manganèse : CHENERY (1955) avait observé au Kenya et en Tanzanie des théiers souffrant d'intoxications aluminiques, ce qui est un comble pour cet arbuste si typiquement acidophile, qui se complait dans les sols chargés d'aluminium ; en fait, sur des sols très riches en manganèse, la synergie Al x Mn contribue à l'absorption de quantités d'aluminium incompatibles avec la physiologie, pourtant tolérante à cet égard, de cette plante.

Il est très probable que les excès de manganèse qui causèrent la ruine des cultures d'arachide de la vallée du Niari (Congo) furent au minimum favorisées par l'aluminium échangeable apparu à la suite des baisses de pH. La synergie aluminium-manganèse apparaît donc capable de provoquer des désastres dans l'économie agricole d'une culture et d'une région ; et à ce titre, il doit être pris très au sérieux chaque fois que la réaction des sols (en fait, pH $\leqslant$ 5,0) est susceptible d'engendrer des quantités notables d'aluminium échangeable.

Pour compléter cette étude, il faut signaler que CLARK (1977) a constaté que des apports d'aluminium diminuaient les concentrations de manganèse observées dans du blé poussant sur solution nutritive. Cet antagonisme *de facto* montre que le problème est sans doute plus complexe qu'il n'apparaît d'après l'exposé. Ceci rejoint des observations faites par SAG (1956) et SEGALEN (1973), montrant que l'aluminium à faibles doses est nécessaire aux plantes.

Très vraisemblablement, à l'inverse de ce que l'on observe habituellement (une synergie aux très basses concentrations d'un élément, ou des deux éléments concernés, se mue en antagonisme lorsque les teneurs avoisinent la « normale »), un antagonisme de régulation aux taux de Al et Mn habituels dans le sol et les plantes saines se transforme, dès qu'un élément (ou les deux) existe en quantités anormales, en une synergie avec toutes les répercussions physiologiques désastreuses que cela peut entraîner.

7.2. ANTAGONISME FER-MANGANESE

Constatant des chloroses ferriques sur caféiers arabica, citrus et rosiers poussant sur un sol d'Ouganda connu pour être riche en manganèse, CHENERY (1954) concluait que cette carence en fer était vraisemblablement provoquée par un excès de manganèse (manganèse assimilable) du sol. COLLINGS (1955) aux Hawaï et MALAVOLTA (1967) au Brésil ont

fait la même constatation respectivement sur ananas et caféier arabica. Il s'agit donc ici, selon toute évidence, d'un antagonisme fer-manganèse bien caractéristique.

Mais « a contrario », s'il y a déficience ou carence du sol en manganèse (assimilable), comme dans certaines plantations de Coffea arabica du Kivu, celle-ci s'accompagne très généralement d'une nette diminution de la teneur des feuilles en fer, d'où chlorose ferrique par défaut de manganèse (CULOT et VAN WAMBEKE, 1958). Les cocotiers poussant sur les sols d'atolls de Polynésie présentent des carences simultanées en fer et en manganèse (IRHO, 1969) ; en conséquence, l'élimination de la chlorose ferrique suppose qu'en premier lieu, on fasse disparaître la carence manganique.

On a donc ici l'exemple d'un antagonisme qui se mue en synergie en fonction de la teneur du sol en manganèse assimilable.

7.3. ANTAGONISME MOLYBDENE-MANGANESE

Les premiers travaux sur l'antagonisme Manganèse-Molybdène furent effectués, semble-t-il, en Australie par MILLIKAN (1947) et ANDERSON (1948). Un peu plus tard, DAVIES (1956) écrit : « l'antagonisme Manganèse-Molybdène est important du point de vue de la nutrition de la plante et il s'agit sans doute d'un facteur qui jette le trouble dans toutes les tentatives faites pour déterminer un état et un niveau du Molybdène du sol satisfaisants pour l'alimentation des végétaux » ; et il cite WELLS qui a trouvé une corrélation négative modérée entre ces deux éléments.

Toutefois, TRUONG, ANDREW et WILSON (1971), étudiant des cultures de légumineuses à la fois en solution nutritive et sur deux sols acides d'Australie contenant 200 et 600 ppm de manganèse total, concluent que des applications de molybdène n'ont eu que peu d'effet sur la toxicité du manganèse, résultat déjà entrevu par WALKER, ADAMS et ORCHISTON (1955). Ils ont bien noté qu'un apport molybdique dans le sol avait nettement fait augmenter le poids de matière sèche d'un trèfle poussant sur un sol riche en manganèse, mais ils attribuent plus cet effet à un meilleur métabolisme de l'azote qu'à une action directe sur le manganèse.

Si on regarde les choses de plus près, il semble logique que cet antagonisme, s'il existe, ne joue que dans un seul sens, c'est-à-dire qu'il soit le fait du manganèse seul ; la disparité des teneurs dans le sol, de l'ordre du ppm pour le molybdène total, du dixième et moins de ppm pour le molybdène assimilable, de l'ordre de la centaine au millier de ppm pour le manganèse total, est telle qu'il paraît illogique d'attribuer un rôle important au molybdène du simple point de vue quantitatif.

Les sols ferrallitiques ne sont pas concernés nommément par tout ce qui précède. Parce que le problème de cet antagonisme ne se pose pas ? ou parce qu'il fut peu étudié ? La seconde hypothèse paraît la plus vraisemblable.

7.4. ANTAGONISMES ZINC-CUIVRE-FER

On a vu précédemment qu'en solution nutritive, le *cuivre* était l'oligo-élément le plus susceptible de nuire à l'alimentation en zinc des plantes (CHAUDHRY et LONERAGAN, 1972).

Toujours à propos du cuivre, BROWN (1961) voit en ce cation un « compétiteur » très actif du fer dont il peut gêner considérablement l'absorption par les plantes, avec d'ailleurs une variabilité considérable suivant les espèces végétales concernées. DROUINEAU et MAZOYER (1962) ont eux aussi constaté que le cuivre présent à doses toxiques dans des sols du sud de la France peut déclencher des chloroses ferriques, de façon assez irrégulière

d'ailleurs (en fait, son action principale paraît concerner ici l'alimentation en potasse qu'il déprime — d'où une répercussion sur le métabolisme du fer — et en azote qu'il exagère).

En ce qui concerne le *zinc*, son excès peut engendrer une chlorose ferrique au même titre que le cuivre et le manganèse (THORNE, 1957) ; car, comme ces deux éléments, il participe au métabolisme du fer. De fait, la maladie du bouton blanc (« white bud disease » en anglais) est assez symptomatique d'un excès en zinc induisant une chlorose ferrique. Enfin, une expérience d'ADUAYI (1972) sur des Coffea arabica poussant en solution nutritive a montré qu'un excès de cuivre provoquait :

— un accroissement de l'alimentation en fer et en cuivre,

— une diminution de l'alimentation en zinc.

Il existerait donc un triple antagonisme : Cu-Zn, Zn-Fe, Cu-Fe.

Les sols ferrallitiques ne sont que très exceptionnellement impliqués dans les expériences citées ci-dessus, mais il n'y a aucune raison pour que les antagonismes décrits ne les concernent pas également. En fait, on connaît encore mal les conditions pour lesquelles ils deviennent dangereux. Plus souvent, aux doses habituelles de ces éléments dans le sol, ils agissent comme des mécanismes de régulation.

7.5. ANTAGONISME ZINC-ARSENIC

On a mis en évidence principalement sur citrus (SIVARAMAN NAIR et MUKHERBE, 1970) et sur cacaoyer au Ghana et au Cameroun (BROWN et BEATENS, 1971 ; GESTIN et ROUX, 1974) un antagonisme Zinc-Arsenic qui induit des carences en zinc d'une gravité telle que la plante en meurt très rapidement. Il paraît utile de préciser de prime abord que cette affection ne se développe qu'à la suite d'application d'herbicides contenant de l'arsenic.

Quant aux mécanismes de cet antagonisme, les auteurs précédemment cités pensent soit à une précipitation par l'arsenic du zinc présent dans le sol à l'état de gel non assimilable, soit à un empoisonnement des radicelles absorbantes par l'arsenic pentavalent (produit de dégradation de l'herbicide) provoquant un déficit d'alimentation minérale surtout apparent et brutal en ce qui concerne le zinc.

7.6. ANTAGONISME ZINC-MANGANESE ?

Il s'agit là d'un équilibre ou peu connu, ou mal étudié encore malgré des études épisodiques depuis 1967 ou 1968. LOPEZ et GRAHAM (1979) le rendent responsable, au moins partiellement, de l'alimentation du trèfle ladino en ces deux éléments dans un certain nombre de sols des Etats-Unis, à cela près qu'un apport de $ZnSO_4$ provoque une augmentation de la nutrition manganique, tandis qu'une application de manganèse n'a aucune influence sur l'assimilation du zinc par la plante.

Cette conclusion se trouve contredite par les observations de BRAR et SEKHON (1976) : le riz prélève de moins en moins de zinc lorsque l'on fait des apports croissants de manganèse et cela est d'autant plus marqué que le zinc est moins abondant dans la solution nutritive.

Rien dans tout cela qui concerne spécialement les sols ferrallitiques, mais on peut retenir que lorsqu'il y a toxicité manganique (fréquente, elle, dans les sols ferrallitiques), l'une des facettes de cette toxicité est une carence en zinc.

7.7. ANTAGONISME CUIVRE-MOLYBDENE

JUSTE (1970) signale qu'en plus de son action sur le fer, le cuivre développe un antagonisme notable avec le molybdène ; et il relate à ce propos une expérience de culture sur sable où l'augmentation de la teneur en cuivre déprimait celle du molybdène dans la plante. Il établit une comparaison avec des cas de carence ou de toxicité en cuivre chez des moutons, selon qu'il étaient nourris avec un fourrage trop riche ou trop pauvre en molybdène. Cet exemple est donné ici afin de montrer que ce phénomène est tout à fait général et qu'il peut affecter les sols ferrallitiques dans lesquels il n'a, semble-t-il, pas été constaté jusqu'à présent.

8. CONCLUSION

A la fin de ce chapitre sur les équilibres, antagonismes, synergies ou interactions, quel que soit le qualificatif employé pour nommer ce phénomène, il semble utile de tenter de faire le point en dégageant quelques idées générales.

Tout d'abord, il apparaît que si les équilibres d'anions entre eux, de cations entre eux sont, toutes proportions gardées, relativement bien connus, les connaissances s'amenuisent à propos des réactions entre oligo-éléments. Et que dire alors des antagonismes et synergies entre deux éléments puisés chacun dans l'une des trois catégories précédemment citées. La plus grande hétérogénéïté y règne : on a des précisions relativement satisfaisantes pour Ca-Al, P-Mn, K-B, etc..., mais pour beaucoup d'autres couples, l'on est réduit, devant des résultats expérimentaux divergents, à formuler des hypothèses sur les actions qu'ils peuvent exercer l'un sur l'autre : antagonismes ? synergies ? on ne sait pas toujours.

En outre, la notion d'équilibre prête à confusion parfois, dès qu'elle met en jeu la dynamique propre d'un élément sous l'influence d'un facteur subordonné, par exemple le pH. On sait qu'on peut modifier le pH d'un sol par un apport de calcium (chaux, carbonate, dolomie...), d'où des répercussions sensibles sur l'assimilabilité du molybdène, du fer, du phosphore, du bore, etc. Faut-il voir là des antagonismes ou synergies Ca-Mn, Ca-Fe, Ca-B, etc. ou un effet propre à la dynamique de ces éléments dûs à la hausse du pH du sol. On a tranché ici, peut-être arbitrairement, en les recouvrant de l'étiquette « assimilabilité et pH », tout en réservant des cas un peu particuliers, comme les antagonismes de l'aluminium et du manganèse avec le calcium. En tout état de cause, il n'est pas facile de savoir quelle part revient à chaque phénomène.

D'autre part, la définition d'antagonisme et de synergie n'est pas toujours et partout perçue avec une précision suffisante. S'agit-il du sol, de l'interface sol-racine, de l'intérieur de la plante ? En effet, l'endroit exact où s'exercent ces antagonismes, synergies et interactions n'est pas toujours et partout indiqué de façon suffisamment claire par les différents auteurs. Il ne s'agit pas là d'un problème purement académique, car un antagonisme de fait dans le sol peut se transformer en synergie pour la plante : prenons l'exemple des anions PO_4^{---} et MnO_4^{--} ; ils sont en compétition dans le sol pour les mêmes sites d'absorption à la surface des feuillets argileux, ce qui, à l'évidence, indique un antagonisme ; par contre, du point de vue de la plante, et surtout de ses racines, un apport de phosphate a pour effet de chasser de ces sites privilégiés de fixation une partie du molybdène, donc de le rendre plus disponible pour les cultures ; la résultante sur les rendements sera donc une synergie, bien que le mécanisme de base soit un antagonisme (dans le sol).

Même si l'on a affaire à la même localisation de ces actions réciproques, une synergie peut se transformer en antagonisme (l'inverse étant vrai également) en fonction des

concentrations de l'un ou des deux éléments pris en compte. On en a vu au cours de ce chapitre plusieurs exemples et on peut ajouter que c'est un phénomène classique lors des antagonismes de régulation.

Ce chapitre peut paraître complexe et touffu ; il ne l'est certainement pas assez, car il faut bien se rendre compte qu'il énumère seulement les équilibres les plus voyants et les plus connus. D'autres existent qui ne furent pas répertoriés ici, généralement parce qu'ils ne sont pas encore suffisamment précisés ou parce qu'ils concernent surtout la physiologie du végétal. On peut citer, sans que cette liste soit exhaustive, quelques « absents ».

Mn-Cu	antagonisme ou synergie ?
Si-Mn	paraît concerner le métabolisme végétal seulement,
Fe-Mo et Al-Mo	assez mal précisé ; paraît surtout relever de la dynamique du molybdène,
Mo-Cu	mis en évidence très récemment (GUPTA et RAM KALA, 1980) sur Vigna sinensis ; mal connu,
N-Mo	semble relever surtout de la microbiologie des sols (Mo est indispensable aux Rhizobiums),
Cu-K (antagonisme)	et Cu-N (synergie) sont peut-être des conséquences de l'action toxique du cuivre... à moins qu'ils n'en soient la cause ?
	etc.

Il reste donc bien des inconnues en ce domaine.

The last but not the least : dans un but didactique, afin de simplifier la présentation d'une matière aussi difficile, aride, et, il faut l'avouer, encore mal connue, on a examiné les actions, réactions et interactions des éléments pris deux par deux, plus rarement par groupe de trois.

Ce genre d'exposé a l'avantage d'être satisfaisant pour l'esprit et relativement compréhensible pour un lecteur, même peu averti. Son plus grave inconvénient est qu'il ne recouvre qu'imparfaitement la réalité et rend mal compte de l'infinie complexité des phénomènes qui se déroulent dans la nature. En voici un exemple simple afin de fixer les idées : des caféiers Robusta, poussant dans le sol ferrallitique fortement désaturé d'une savane du sud de la République Centrafricaine, sol très mal fourni en calcium et en magnésium, mais à peu près convenablement pourvu en potassium, ont réagi à un apport de sulfate de magnésie en augmentant, bien sûr, leur nutrition magnésienne, mais aussi calcique ; en effet, cet apport de magnésium, ayant rétabli un équilibre convenable Mg/K, a débloqué de ce fait l'inhibition que faisait peser l'excès de potassium sur l'absorption du calcium (FORESTIER, 1966).

Il s'agit là d'un exemple simple et simplifié. Si on essaie de grouper plusieurs éléments et de définir l'importance que peut avoir l'un d'eux pour les autres, on obtient des interrelations si compliquées qu'on se demande s'il est possible d'en dégager un schéma compréhensible sinon pratique. Ainsi, un Guide d'utilisation des oligo-éléments, assez largement diffusé en Amérique Latine par un distributeur d'engrais, donne les indications suivantes :

Bore : (en ce qui concerne la plante), « il règle une bonne absorption du calcium, mais, faute de calcium, il devient toxique ; il règle la valeur du rapport K/Ca et a des relations étroites avec le magnésium, le potassium et le phosphore » (en ce qui concerne le métabolisme végétal ?). « Un déficit en bore (dans le sol ?) provoque une déficit en phosphore... Un déficit en potassium provoque une déficience en bore et la carence de ce dernier engendre d'autre part une déficience en cuivre. »

Cuivre : « Des excès d'azote et de molybdène, ou de matière organique peuvent induire des carences en cuivre dans la plante. Le cuivre agit également sur le métabolisme de l'azote en même temps que le manganèse et le zinc dont les disponibilités influent aussi sur le cuivre. Le cuivre a une action conjointe avec le bore et le calcium. Faute de potasse, il y a déficience en bore, et, du coup, en cuivre. S'il y a déficit en cuivre, le zinc manque. Mais l'excès de cuivre provoque déficiences en fer et molybdène et inhibe le métabolisme de l'azote. »

Etc.

Passons sur quelques imprécisions (on ne sait jamais très bien s'il s'agit du sol ou du végétal) et quelques omissions, par exemple les antagonismes bore-azote et potassium-bore, pour reconnaître que ces « instructions » donnent à la notion d'équilibre ou d'interaction une dimension et une complexité qu'est loin d'avoir l'exposé trop simple, fait ici, de mécanismes qui, par une hypothèse simplificatrice, concernent des éléments pris deux à deux.

Le lecteur doit bien se persuader que c'est la complexité des actions réciproques entre éléments qui est la règle dans la nature et non pas la simplicité, trop didactique pour être absolument vraie, de ce chapitre.

Toutes ces incertitudes, ces connaissances incomplètes, ces à-peu-près ne doivent pas faire oublier l'énorme acquis des connaissances sur les antagonismes, synergies et interactions des éléments utiles aux plantes. En particulier, en ce qui concerne les anions et cations majeurs, on peut tirer quelques lignes directrices pour les sols :

Le rapport C/N est le plus favorable à l'alimentation en azote des cultures s'il est compris entre 9 et 12 ; il paraît acceptable pour des valeurs un peu supérieures à 12, d'ailleurs fréquentes dans les sols ferrallitiques sous végétation naturelle. Pour C/N > 25, la minéralisation de la matière organique ne se fait plus ou se fait mal.

Le rapport N/P_2O_5 est optimum entre 2 et 4 si on prend en compte le phosphore total et entre 10 et 20 s'il s'agit du phosphore assimilable méthode Bondy.

Le rapport N/S est considéré comme « bon » aux alentours de 10, mais il semble qu'il puisse varier sans trop d'inconvénients de 5 à une limite supérieure probablement un peu inférieure à 15.

L'équilibre phosphore-silice ne peut jusqu'à présent être chiffré, mais il n'apparaît que rarement comme la cause de désordres nutritionnels dans les sols ferrallitiques (sauf en sols presqu'exclusivement formés d'hydroxydes de fer et d'alumine).

Le rapport Ca/Mg peut varier entre 1 et une limite supérieure (si elle existe) très élevée probablement de l'ordre de 40 à 50 (bien qu'à ce propos, il faille réserver le cas des plantes acidophiles, théier, hévéa, ananas, etc...). Au-dessous de 1, on peut craindre des désordres dans la nutrition magnésienne et parfois des ennuis d'enracinement dûs à une mauvaise structure (sols à argiles illitiques et montmorillonitiques). Un optimum valable pour presque toutes les culture va de 1,5 à 4 à 5 et plus.

Un rapport Mg/K de l'ordre de 3 ou légèrement supérieur à 3 est dans l'ensemble favorable à la plus grande partie des plantes cultivées. Les valeurs maximales et minimales paraissent varier assez largement suivant le type de culture et des teneurs du sol en ces deux éléments.

Le rapport Ca + Mg/K convient généralement s'il est compris entre 15 (valeur moyenne) et 25 à 35.

Les choses sont moins nettes en ce qui concerne les interférences des cations et anions entre eux : les actions réciproques entre calcium-phosphore, magnésium-phosphore, potassium-azote, phosphore-potassium relèvent-elles de la notion d'équilibre ou de la dynamique propre à ces éléments ? Elles existent et c'est cela qui est important.

Dès que l'on entre dans le domaine des oligo-éléments, les connaissances se font plus partielles, plus floues aussi. Il est impossible pratiquement de chiffrer ces équilibres. Toutefois, un certain nombre d'actions réciproques paraissent bien établies en dehors de toute considération sur la dynamique des uns et des autres :

- antagonisme Calcium-aluminium,
- antagonisme Calcium-manganèse,
- antagonisme Potassium-bore,
- antagonisme (ou synergie) Azote-bore,
- antagonisme Phosphore-aluminium,
- antagonisme Zinc-cuivre,
- synergie Phosphore-manganèse,
- synergie Aluminium-manganèse,

etc.

Et il ne s'agit là que des équilibres les plus « marquants ».

Mais il reste beaucoup de connaissances à acquérir pour avoir une vue précise sur les équilibres, ceux qui sont cités ici et tous les autres, ceux qui sont peu connus ou tout à fait inconnus...

les teneurs du sol en éléments, anions et cations, compatibles avec la culture

(valeurs-critiques, échelles de fertilité et limitations agricoles)

1. INTRODUCTION

Lorsque des agronomes habitués aux sols des pays tempérés se trouvent confrontés pour la première fois au milieu ferrallitique, ils éprouvent souvent un grand étonnement à constater la pauvreté en bases de ces sols, la faiblesse du complexe absorbant, la difficulté d'assimilation du phosphore du sol et la fragilité des ressources en azote. Certes, les connaissances acquises en milieu tempéré restent valables, mais il faut faire un sérieux effort pour les adapter à ce nouvel environnement parfois bien déroutant : exubérance folle de la végétation naturelle sur des sols qui se révèlent souvent d'une extrême fragilité dès qu'ils sont privés de cette couverture végétale.

L'ignorance des lois de l'agronomie ferrallitique a provoqué bien des échecs dans le passé. Avec le progrès de nos connaissances, surtout depuis la seconde guerre mondiale, il est possible maintenant d'établir une sorte de guide pour aider à l'interprétation des analyses de sol. Celles-ci, obtenues à grands frais dans les laboratoires, ont pendant trop longtemps constitué un support dont ni les analystes, ni les agronomes et pédologues qui les avaient demandées n'arrivaient à cerner tous les enseignements qu'on pouvait en tirer, et dont, pire parfois, on interprétait les données de façon erronée. Ceci ne veut pas dire que maintenant tout est parfaitement connu, mais la somme des renseignements accumulés permet de poser un certain nombre de bases qui peuvent servir à la fixation de critères d'évaluation.

Ce sera le but, ambitieux, de ce chapitre, de faire une synthèse des données acquises depuis une trentaine d'années afin d'en faire une sorte de mémento des significations les plus communément admises des chiffres fournis par les fiches d'analyse, ceci en termes de limitations agricoles ou de fertilité potentielle suivant le cas.

Voulant couvrir l'ensemble du domaine ferrallitique, il était difficile de ne pas buter sur l'écueil de la collection de « faits divers » (au sens agronomique s'entend). Un sérieux élagage critique a permis, semble-t-il, d'en éviter la majorité des inconvénients.

Un deuxième défaut de ce genre d'essai est une présentation trop didactique qui laisse supposer que tous les problèmes sont résolus et qu'il n'y a plus qu'à appliquer les règles énoncées. L'auteur ne pouvait l'éviter totalement sous peine de devenir confus et embrouillé, donc peu compréhensible. Ce sera au lecteur de ne jamais prendre une valeur chiffrée comme sûre et absolue dans tous les cas. La nature est tellement diverse qu'il est toujours bon de confronter les données écrites dans un livre à celles que l'on constate sur le terrain, et de faire ensuite la part des choses.

Ce chapitre s'attachera surtout à délimiter des domaines utiles pour la mise en valeur sous forme d'appréciations de limitations agricoles ou de fertilité potentielle, cherchant

en particulier à définir des seuils de carence ou de déficience ou encore de toxicité, les associant chaque fois que cela sera possible à une échelle (de limitation ou de fertilité) permettant une meilleure interprétation des potentialités du sol.

2. AZOTE

2.1. GENERALITES

L'azote est l'un des éléments essentiels de la fertilité de tous les sols et certainement l'un de ceux dont la déficience est le plus généralement constatée dans les sols ferrallitiques. De ce fait, les fumures azotées engendreront bien souvent des accroissements de rendement proportionnels à cette fumure, au moins jusqu'à un certain point. Mais l'apport ne peut être, sauf cas exceptionnel, qu'un appoint à l'azote contenu dans le sol.

Certes, on sait que cet azote est normalement emmagasiné dans la matière organique des sols sous une forme inassimilable par la plante. Sa libération se produit, au cours des phénomènes de minéralisation, par sa transformation d'abord en sels ammoniacaux, puis en nitrites et finalement en nitrates, ces derniers étant la forme de choix pour l'alimentation du végétal (sauf en ce qui concerne le riz cultivé en rizières inondées) (1) (cf. chap. VIII, p. 106).

Comme cette transformation de l'azote organique en azote minéral s'effectue habituellement sans difficulté dans les sols ferrallitiques pourvu que certaines conditions, de pH en particulier, soient remplies, quelques auteurs ont choisi la matière organique comme critière de fertilité des sols, mais la plupart restent fidèles à la mesure de l'azote total par la méthode Kjeldahl comme test d'appréciation.

2.2. TENEURS EN MATIERES ORGANIQUES ET LIMITATIONS AGRICOLES QUI EN DECOULENT

La matière organique du sol sous végétation naturelle donne une estimation assez exacte — bien que partielle — du potentiel de fertilité nitrique d'un sol, principalement en conditions tropicales.

Elle est en effet l'unique fournisseur d'azote pour les plantes (sauf pour les légumineuses). Elle contient une bonne part des cations échangeables ainsi que du phosphore des sols fortement désaturés (en majorité sols ferrallitiques) de la ceinture chaude et humide du globe. Enfin, les teneurs en matière organique se relient assez facilement à la texture : les sols lourds argileux en sont généralement mieux pourvus que les sols sableux.

D'où le tableau XII.1., fourni par Sys (1978), qui permet d'évaluer les potentialités d'un sol sous forêt équatoriale humide situé à altitude basse à moyenne (jusqu'à 1 000-1 500 m) d'après son taux de matière organique.

---

(1) L'une des raisons de cette préférence du riz pour l'azote ammoniacal est la très facile transformation des nitrates en nitrites — toxiques — dans le milieu réducteur qui constitue la rizière inondée.

TABLEAU XII.1. — *Evaluation des limitations agricoles d'après la teneur en matière organique d'un sol sous forêt équatoriale sempervirente - Horizon 0-15 cm d'après SYS (1978)*

Teneurs en matière organique % / Groupe de cultures	Limitations				
	Nulle	Légère	Modérée	Forte	Très forte
Cultures exigeantes	>2,4	1,5-2,4	0,8-1,5	<0,8	—
Cultures moyennement exigeantes	>2	1-2	<1	—	—
Cultures peu exigeantes	>1,5	0,8-1,5	<0,8	—	—

L'appréciation de la teneur en matière organique ne permet pas toujours, par elle-même, de définir le potentiel nitrique efficace d'un sol ; il faut en plus tenir compte de la facilité avec laquelle cette matière organique peut se minéraliser. Un rapport C/N trop élevé est susceptible de ralentir progressivement cette transformation s'il atteint des valeurs comprises entre 15 et 25 et de l'arrêter pour des valeurs supérieures à 25 (rares en fait dans les sols ferrallitiques) ; un pH inférieur à 5 ou la fraîcheur de la température en altitude peuvent jouer le même rôle.

Lorsque l'altitude reste faible, sous condition que le rapport C/N soit compris entre 7 et 13, la correspondance entre azote total et matière organique est à peu près la suivante pour la Côte d'Ivoire, d'après DABIN et LENEUF (1960) :

TABLEAU XII.2. — *Matière organique et azote total d'après DABIN et LENEUF (1960)*

N °/oo	Matière organique	N°/oo	Matière organique
0,11 à 0,25	0,17 à 0,43	0,80 à 1,50	1,35 à 2,55
0,25 à 0,45	0,43 à 0,76	1,50 à 3,0	2,55 à 5,10
0,45 à 0,80	0,76 à 1,35	3,0 à 6,0	5,0 à 10,1

Chacune de ces tranches correspond à une catégorie de fertilité.

2.3. TENEURS EN AZOTE TOTAL DU SOL ET ECHELLES DE FERTILITE

En Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale, on considère que des teneurs du sol en azote total de 1 °/oo à 2 °/oo sont satisfaisantes, mais on constate, malheureusement, que les sols ayant moins de 1 °/oo d'azote total sont les plus nombreux.

Cette appréciation coïncide avec les échelles de fertilité que répertorie MALAVOLTA (1976) pour les sols du sud et du centre-est du Brésil : cet auteur fait ressortir les divergences d'appréciation de divers auteurs sur les teneurs en azote du sol au cours de 25 années, ce qui se traduit par un abaissement notable des valeurs-seuil pour chacune des catégories (tableau XII.3.).

Comme cet azote existe principalement sous forme organique inassimilable, il faut, si l'on veut estimer la fourniture probable d'azote nitrique aux plantes, tenir compte aussi de la vitesse de minéralisation de la matière organique. Ceci n'a pas échappé à MALAVOLTA (op. cit.) pour qui il existe une nette corrélation entre nitrification et pH ; de fait, pour des pH inférieurs à 6, la vitesse de nitrification diminue progressivement au point de devenir très faible entre pH 4,0 et pH 5,0.

TABLEAU XII.3. — *Teneurs en azote total du sol et fertilité « in » MALAVOLTA (1976)*

d'après CATANI et KUPPER, en 1946	d'après GARGANTINI et *al.*, en 1970	Apréciation de la de la fertilité
N % total	N % total	
<0,1	<0,075	Sol pauvre
0,11-0,30	0,075-0,125	Sol de fertilité moyenne
>0,30	>0,125	Sol riche

De son côté, DABIN (1970) indique que les rendements en manioc des Terres de Barre du Togo (sols ferrallitiques faiblement désaturés) suivent assez étroitement la vitesse de nitrification :

pas de nitrification, même après 18 jours	Rendement 6 T/ha de racines
début de nitrification au bout de 15 jours	Rendement 10 T/ha de racines
début de nitrification à 5-6 jours	Rendement 30 à 40 T/ha de racines

L'activité des bactéries responsables de la minéralisation de l'humus étant fort sensible à la réaction du sol, ce même auteur (DABIN, 1961) donne une estimation empirique de la fertilité en fonction non seulement de la teneur en azote du sol, mais du pH. D'où le tableau XII.5. qui fait dépendre la fertilité nitrique du sol, non seulement de la teneur en azote total, mais aussi du pH, principal facteur qui conditionne, en pratique, la minéralisation de l'humus.

On peut constater (tableau XII.5.) que si à pH 7 une teneur en azote de 0,4 °/oo est considérée comme bonne à très bonne, la même quantité d'azote dans un sol à pH 4,5 ne donne lieu qu'à l'appréciation « très faible ».

Par contre, pour un même pH, la fourniture d'azote aux plantes sera sensiblement proportionnelle à la teneur en azote du sol. C'est ce que constate DABIN (1956) pour les rendements en manioc des Terres de Barre du Dahomey (sols ferrallitiques faiblement désaturés), où, pour un même pH, ici pH 6, la récolte passe de 30 tonnes de racines à l'hectare à 60 tonnes si le taux d'azote du sol croît de 0,5 à 1 °/oo.

LATHAM (1971) précise que, dans les sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire, on peut espérer les rendements suivants en coton-graine en fonction des taux d'azote du sol (à noter que les pH des sols à cotonnier sont en gros voisins) (Tableau XII.4.).

TABLEAU XII.4. — *Teneur en azote total du sol et rendement en coton d'après LATHAM (1971)*

N total du sol °/oo	Rendements en coton-graine kg/ha
<0,4	Inférieurs à 500 kg
0,4 à 0,75	Entre 500 et 1 000 kg
>0,75	Supérieurs à 1 000 kg

Cette proportionnalité entre azote total du sol et rendements tient au fait que « le coefficient de minéralisation de l'humus pour des pH semblables paraît assez constant pour les divers types de sol et les divers niveaux d'azote total » (CHARREAU et FAUCK, 1969, à propos des sols ferrallitiques faiblement désaturés, cultivés de Casamance au sud du Sénégal).

TABLEAU XII.5. — *Potentiel de fertilité du sol en fonction du pH et de la teneur en azote total d'après* DABIN *(1961)*

N total du sol °/oo	pH				
	7	6,5	6	5	4,5
10	exceptionnel	exceptionnel	exceptionnel	très bon	bon
9					
8					
7					
6					
5					
4					
3					
2,50			très bon	bon	
2					moyen
1,50		très bon			
1,20			bon	moyen	
1,00	très bon				
0,80		bon			médio
0,70			moyen	médio	
0,60					
0,50					très bas
0,40	bon	moyen	médio	très bas	
0,30					
0,25	moyen	médio	très bas		
0,20					
0,15	bas	bas			
0,10					

Il y a peu d'exception à cette règle ; toutefois, la minéralisation se fait parfois trop lentement pour couvrir les besoins des plantes dans les sols ferrallitiques humifères d'altitude, sols pourtant fort bien pourvus en azote total : c'est ainsi que BIRCH (1959-a) indique que l'azote est le principal facteur limitant des pâturages des Highlands du Kenya situés entre 2 000 et 3 000 mètres d'altitude.

2.4. DISCUSSION : LES BESOINS DES PLANTES CULTIVEES ET LA FOURNITURE D'AZOTE PAR LE SOL

Il faut mettre à part le cas des légumineuses : ces plantes n'ont besoin en principe que de fort peu d'azote, uniquement au moment de la levée en attendant l'infestation des racines par les rhizobiums. A partir de ce moment, l'azote du sol n'est plus indispensable (mais peut quand même être utilisé, s'il est abondant).

Fourniture totale d'azote par le sol

Certains sols ferrallitiques arrivent à fournir aux plantes une quantité d'azote optimale. Ces cas sont, à vrai dire, assez rares, mais il est intéressant de les signaler.

Ce sont tout d'abord les sols sur défriches forestières où la minéralisation de l'humus est favorisée par les façons culturales et, surtout, par l'élévation du pH due aux cendres ; elle se situe alors à des niveaux compatibles avec une nutrition azotée optimale des plantes. Les reprises de jachère anciennes, forestières ou herbacées, ou encore de savane arbustive, peuvent également présenter cette particularité (VAN WAMBEKE, 1971 citant divers auteurs ayant travaillé dans le centre du Brésil).

Il en est aussi de même pour les sols ferrallitiques d'altitude, souvent très riches en humus : ainsi KROLL (1963) constate que le pyrèthre ne répond pas aux engrais azotés dans les Highlands du Kenya et du nord de la Tanzanie, même après avoir corrigé la carence phosphorique, la plus importante dans ces régions.

Dans le cas des cultures annuelles, cette excellente fourniture d'azote se poursuit rarement au-delà de deux ans ; elle se limite assez souvent à la première année de culture. Lorsqu'il s'agit de cultures pérennes, l'effet peut être de beaucoup plus longue durée : ainsi les caféiers Robusta des Uellés (Nord du Zaïre) s'alimentent en apparence correctement à partir de l'azote du sol, à condition qu'il n'y ait pas concurrence avec des graminées (FRANKART et CROEGAERT, 1953).

L'apport d'azote par une couverture de légumineuses est l'une des raisons invoquées pour expliquer l'influence très favorable de cette pratique culturale sur les cultures pérennes, en particulier caféier, palmier à huile, cacaoyer, hévéa (IRHO, 1968 en Afrique ; COULTER, 1972 en Malaisie). Centrosema pubescens en mélange dans les pâturages du Ghana améliore substantiellement la pousse des graminées (WILSON et LANSBURY, 1958). Par contre, l'effet « azote » d'une jachère à Stylosantes gracilis est assez controversé en République Centrafricaine (BRAUD, 1958 ; MOREL et QUANTIN, 1964).

Cas habituel : le sol ne fournit qu'insuffisamment l'azote

Dès qu'ils sont cultivés un peu longuement, la plupart des sols ferrallitiques sont incapables de subvenir aux besoins d'azote nécessaire à l'obtention de récoltes optimales.

D'innombrables exemples montrent que pratiquement toutes les plantes cultivées réagissent favorablement à des apports croissants d'azote par les engrais (BENAC, 1965 au Cameroun ; BROWN, 1966 au Malawi ; PY, 1963 en Guinée ; R.R.I.M., 1976 en Malaisie). Toutes les formules d'engrais proposées par les stations expérimentales comprennent de

l'azote, qu'il s'agisse de cultures pérennes ou annuelles (à moins que des raisons économiques ne poussent à le supprimer).

On observe alors des accroissements linéaires de rendement en fonction de l'apport d'engrais azotés, comme FRITZ (1967) sur Chloris gayana à la Réunion, CROWDER et *al.* (1974) sur Digitaria decumbens en Colombie, CHAPMAN (1965) sur ignames à la Trinidad, etc., ceci au moins jusqu'à un certain niveau de fertilisation azotée. Car, si la plupart des plantes répondent favorablement à des doses croissantes d'azote, leur capacité d'assimilation n'est pas illimitée : ainsi, des phénomènes de verse se sont produits sur riz pluvial en Côte d'Ivoire et en République Centrafricaine à la suite de fumures azotées trop abondantes, diminuant de ce fait les rendements dans des proportions importantes au lieu de les augmenter (les parcelles ayant reçu de l'azote ont eu des récoltes inférieures à celles qui n'en avaient pas reçu).

Même si l'on fait abstraction de toute considération économique, des fumures azotées croissantes ne peuvent indéfiniment « pousser » les rendements. On assiste à un plafonnement qui dépend des types de végétaux au sens le plus étroit du terme allant jusqu'au cultivar : telle variété locale connue pour sa rusticité tolérera difficilement quarante kilogrammes d'azote à l'hectare, tandis qu'une autre, sélectionnée pour sa forte productivité, en exigera au minimum une centaine de kilogrammes, ceci dans les mêmes conditions. Il est vrai que les rendements seront incomparablement plus élevés dans le second cas que dans le premier.

Coefficient d'utilisation des engrais azotés

L'emploi des engrais azotés n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes. C'est d'abord l'acidification du sol (cf. chap. X., p. 210), chaque fois qu'un cation alcalino-terreux, le calcium en fait, n'est pas inclus dans la formule d'engrais. Ceci va de pair avec la lixiviation aisée des nitrates étudiée lors du chapitre consacré à la dynamique des éléments. D'où des pertes importantes, et, par suite, des coefficients d'utilisation le plus souvent désespérément faibles : GREENLAND (1971), analysant une expérience faite en Zambie, estime qu'une culture de Chloris gayana a vraisemblablement utilisé un peu moins de 50 % de l'azote minéral apporté (600 kg/ha de N) ; mais beaucoup d'autres auteurs calculent que l'engrais azoté ne sert à la plante que dans une proportion de 10 à 40 % et, exceptionnellement, à plus de 50 %. Ceci n'est d'ailleurs pas propre aux sols ferrallitiques, car, dans les sols alluviaux de Thaïlande cultivés en rizières inondées, WALCOTT et *al.* (1977) trouvent que le riz n'utilise que 25 à 34 % des 100 à 150 kilogrammes de l'azote fourni sous forme de sulfate d'ammoniaque.

Evidemment, il s'agit là d'un grave problème économique, que l'on sait mal résoudre. On a vu précédemment (chap. IX, p.173) que les substances destinées à retarder la nitrification ne donnaient que des résultats aléatoires. Peut-être est-ce dû à une mauvaise connaissance de leur mécanisme d'action ? En tout cas, leur emploi ne se développe guère sous les tropiques.

Importance du taux de matières organiques du sol

Il est un aspect, en ce domaine, que l'on a trop tendance à négliger, c'est celui du niveau organique des sols, bien que chacun sache qu'il s'agisse du principal réservoir d'azote.

Lorsque ce taux organique est très élevé, les fumures azotées ne sont généralement pas indispensables, même si elles augmentent encore un peu le volume des récoltes : ainsi, les palmeraies d'Elaeïs guineensis de Côte d'Ivoire bien couvertes au départ par un tapis de légumineuses ne répondent guère à la fumure azotée (OLLAGNIER et *al.*, 1970) ; ce n'est toutefois pas entièrement le cas pour d'autres cultures : caféier arabica, cocotier (MANCIOT, OLLAGNIER, OCHS, 1979) et même hévéa pour lequel le supplément de vigueur apporté

par un engrais azoté diminue la durée de la défoliation des arbres normalement provoquée par les attaques d'oïdium en saison sèche (R.R.I.M., 1976). Il ne s'agit là que de cultures pérennes dont les plantes de couverture, puis les ramures des arbres couvrent le sol au maximum, le nourrissant des débris organiques qu'ils laissent tomber.

Tel n'est pas le cas avec des cultures annuelles sarclées. Evidemment, une jachère assez longue peut rétablir un niveau organique suffisant pour mobiliser 60 à 80 kilogrammes d'azote par an pendant une à deux années. Mais il est un aspect que l'on oublie souvent, c'est que l'incorporation au sol de compost ou, mieux, de fumier de ferme permet non seulement une utilisation optimale de l'azote organique présent dans le sol, mais également une amélioration sensible du coefficient d'utilisation de l'engrais azoté minéral.

3. SOUFRE

3.1. GENERALITES

Le soufre est l'un de ces éléments dont on découvre de plus en plus l'importance sous les tropiques. Si les toxicités sont très rares, il n'en est pas de même des carences et déficiences.

Les travaux de GREENWOOD (1952) avaient donné le signal d'une première vague d'expérimentations au cours de laquelle on avait reconnu un grand nombre de carences et déficiences ; COLEMAN (1966) a établi la liste des cultures et des pays concernés et a ainsi dressé le constat du fait que la ceinture tropicale du globe n'est guère épargnée. Il serait fastidieux de reprendre ici une énumération qui, même en la complétant, serait bien loin d'être exhaustive. Il vaut mieux donner quelques exemples significatifs.

En 1955, pour une cause fortuite (mauvais approvisionnement du marché), on a épandu de l'urée, au lieu du sulfate d'ammoniaque employé habituellement, sur les champs de cotonnier d'une station agronomique spécialisée dans cette culture à Bambari en République Centrafricaine. Les cotonniers restèrent rachitiques et ne manifestèrent aucunement les excellentes réponses au sulfate d'ammoniaque constatées les années précédentes et alors attribuées à l'azote. Les agronomes en place eurent alors l'idée de comparer les symptômes observés à ceux décrits à propos d'une carence en soufre du cotonnier en Afrique Orientale. L'année suivante, on a pu calmer cette prétendue faim d'azote par des apports de sulfate de soude, sulfate de magnésie, etc., alors qu'urée, nitrate de soude et nitrate d'ammoniaque restaient sans effet (BRAUD, 1962 et 1964). La preuve était donc faite de l'insuffisance de la fourniture de soufre par le sol pour une culture de coton.

On s'est aperçu ensuite qu'une part très importante des sols de République Centrafricaine consacrés au cotonnier étaient en état de déficience ou carence. Une extension géographique de cette sorte ne paraît pas exceptionnelle puisque l'immense Campo Cerrado brésilien semble souffrir d'une carence apparemment assez généralisée en soufre. On y a trouvé 35 ppm de soufre organique et 3 ppm de soufre sous forme de sulfates (MC CLUNG, MARTINS et FREITAS, 1959).

Parfois ce sont des pans entiers de nos connaissances qu'il faut réviser à ce propos. BEATON (1966) écrivait que le bananier souffrait peu des carences en soufre et que l'une des rares formellement constatées l'avait été au Honduras, confirmant ainsi l'opinion de CHARPENTIER et MARTIN-PLEVEL (1966 et 1967) pour qui le soufre ne posait guère de problème dans les plantations de Côte d'Ivoire. On s'est aperçu depuis lors que non seulement le soufre était un élément fort important dans l'alimentation du bananier, mais que l'apport continu d'urée et de chlorure de potassium (au lieu de sulfate d'ammonium et de

sulfate de potassium) engendrait des carences en soufre tout à fait caractéristiques dans les bananeraies de Côte d'Ivoire (MARCHAL, MARTIN-PREVEL et MELIN, 1972).

Bien souvent, avec le remplacement du sulfate d'ammonium par l'urée, on constate que l'absence d'apport de soufre induit des diminutions de croissance et de rendement chez le palmier à huile et le cocotier (CALVEZ, OLIVIN et RENARD, 1976 ; OCHS et OLLAGNIER, 1977).

3.2. TENEURS EN SOUFRE COMPATIBLES AVEC LES CULTURES

Sans doute la complexité et l'apparente difficulté de l'analyse du soufre dans le sol ont-elles découragé les expérimentateurs ! En tout cas, on s'est bien souvent contenté, lorsque l'on soupçonnait l'existence d'une carence en soufre, d'ajouter des engrais contenant cet élément et d'observer les réactions de la plante ; au besoin, on complétait l'étude par une analyse folliaire. Ce qui fait que les mesures du soufre présent dans le sol restent relativement rares.

Malgré les travaux de quelques devanciers (STOREY et LEACH, 1933 au Malawi ; HESSE, 1957 au Kenya et en Ouganda), il a fallu attendre le début de la décade soixante dix pour posséder des normes apparemment valables en milieu tropical.

Seuil critique pour le soufre total du sol

Selon DABIN (1970-b), la limite inférieure admissible de soufre total du sol (en culture cotonnière de Côte d'Ivoire) paraît se situer entre 70 et 100 ppm de soufre total, ceci pour un sol de texture moyenne, donc ayant approximativement une teneur cumulée en argile et limon granulométriques de l'ordre de 15 à 35 % dans l'horizon humifère. Il s'agit là de sols ferrallitiques.

Par contre, dans un sol brun eutrophe dérivé de matériaux volcaniques (avec une somme argile + limon supérieure à 45 %), on peut craindre des carences graves en culture bananière dès que la teneur en soufre total du sol est inférieure à 150 ppm. On ne sait si ce résultat est applicable tel quel aux sols ferrallitiques.

En fait, une certaine incertitude règne à propos des teneurs en soufre du sol nécessaires aux plantes. C'est ainsi qu'ENWEZOR (1976) a observé que, sur 45 unités de sol du Nigéria (dont une bonne part de ferrallitiques), s'il y a eu vingt réponses positives du maïs à l'apport de sulfate d'ammoniaque, il n'y a malheureusement guère de corrélation entre les teneurs en soufre total et les rendements de la culture : sur un sol ferrallitique ayant 80 ppm de soufre total, on pourra avoir une réponse à l'apport de soufre, tandis que dans des sols du même type possédant entre 30 et 50 ppm de soufre total elle ne se produira pas toujours. L'auteur pense que le soufre des sulfates donnerait sans doute de meilleures corrélations.

BITTENCOURT et *al.* (1978) ont trouvé que les sols de l'Etat de São Paulo (Brésil) possèdent entre 13 et 25 ppm de S sous forme de sulfate, mais ne disent pas si un seuil de carence ou de déficience est inclus dans cet intervalle. En Côte d'Ivoire et à Madagascar, des teneurs de 70 ppm de S organique et 4 ppm de S des sulfates n'engendrent pas de carences en sols sableux de cocoteraies (OLLAGNIER et OCHS, 1972).

On a vu précédemment, page 175, à propos de la dynamique du soufre, que les carences en cet élément, si fréquentes en sol de savane, étaient vraisemblablement à mettre en grande partie sur le compte d'une nature « différente » de l'humus (puisqu'elles s'atténuent et disparaissent au bout de quelques années de culture sans apport de composés soufrés). Ici aussi, il est certain que la dynamique propre à ce métalloïde — que l'on connaît assez mal — doit jouer dans des proportions importantes. Il est possible, de ce fait, que les résultats fort disparâtes d'ENWEZOR (op. cit.) soient dus à une telle cause.

Quantités de soufre apportées par les engrais

Mis en présence d'un déficit en soufre provenant du sol, les agronomes et agriculteurs ont tendance à le combattre empiriquement par des engrais. Les plus employés sont évidemment les formes sulfates des engrais habituels, dont on trouvera ci-dessous les teneurs approximatives en soufre :

Sulfate d'ammoniaque $(NH_4)_2\ SO_4$	24 % de S
Sulfate de potassium K_2SO_4	17 % de S
Superphosphate simple à 18 % de P_2O_5	11 % de S
Superphosphate enrichi à 25 % de P_2O_5	9 % de S
Superphosphate enrichi à 35 % de P_2O_5	5 % de S
Superphosphate concentré (super triple) à 48 % de P_2O_5	1 % de S

On utilise parfois le soufre-élément et le gypse ($CaSO_4$, 2 H_2O, à 24 % de S) ; les déchets organiques systématiquement épandus se révèlent très efficaces (DABIN, 1970-b). Toutefois, le sulfate d'ammoniaque et le sulfate de potasse (dans une moindre mesure) restent les formes de choix de l'apport de soufre au sol pour des raisons pratiques et économiques.

Il fut précisé au chapitre consacré aux équilibres (p. 242) que les agronomes qui, initialement préconisaient un rapport N/S de 1 dans la fumure minérale (en fait la proportion qui est celle du sulfate d'ammoniaque), se contentent souvent maintenant de N/S = 2 (moitié urée, moitié sulfate d'ammoniaque), qu'il s'agisse des plantes annuelles ou de plantes pérennes comme le palmier à huile.

Quant aux quantités de soufre nécessaires, on les estime à 10 kg de soufre par hectare pour l'arachide (PREVOT et OLLAGNIER, 1964), chiffre qui paraît faible, car on préconise 50 kg de soufre par hectare et par an sur bananier, à vrai dire plante grosse consommatrice de ce métalloïde (MARCHAL, MARTIN-PREVEL, MELIN, 1972).

En fait, en cultures intensives, les applications de soufre habituelles devraient se situer entre 20 et 40 kg par hectare et par an pour éviter tout ennui et tout risque, après lixiviation et prélèvement par les cultures, de voir apparaître des déficiences.

3.3. DISCUSSION

Il paraît difficile de conclure ce paragraphe sur les teneurs-limite en soufre et la correction des carences sans faire un constat « d'à peu près ». Trop peu nombreux sont les agronomes qui se sont efforcés d'analyser le soufre contenu dans le sol pour qu'il soit possible d'être absolument certain que les chiffres cités ci-dessus soient valables en toutes circonstances.

Cette situation provient aussi du fait que les carences et déficiences en soufre, aussi fréquentes qu'elles puissent être, se sont trouvées masquées par le sulfate d'ammoniaque longtemps l'engrais azoté le plus utilisé. Depuis que l'usage de l'urée s'est répandu, le problème retrouve un regain d'actualité. Dès qu'elles sont reconnues, ces carences et déficiences se révèlent très faciles à éliminer par l'emploi de n'importe quelle forme du soufre et les quantités assez modestes à mettre en jeu ne font généralement pas sentir le besoin de connaissances plus approfondies.

4. PHOSPHORE

4.1. GENERALITES

Le phosphore est, avec l'azote, l'élément qui limite le plus les rendements des plantes cultivées en sols ferrallitiques. On peut même avancer, avec quelque certitude, qu'en importance et en extension géographique c'est la seconde déficience ou carence de ces sols par ordre d'importance après l'azote (ce qui implique, statistiquement, que dans certains sols elle pourra être la première).

Il est fréquent, en outre, que des sols initialement bien pourvus en phosphore, comme les Terres de Barre du Togo et du Bénin, accusent un épuisement rapide au bout d'un certain nombre d'années de culture.

Naturellement, on s'est efforcé de déterminer le potentiel phosphorique des sols ferrallitiques. Mais le problème se trouve compliqué par la multiplicité des méthodes analytiques (chap. VIII., p. 113 s.q.). Il ne sera question ici que des procédés dits de routine employés de façon courante par les laboratoires d'analyse situés sous les tropiques.

Chaque fois qu'un chiffre, limite ou seuil, et, mieux, une échelle de fertilité seront indiqués, l'un et l'autre devront faire référence à la méthode analytique qui a permis leur obtention. Le lecteur est donc prié de se reporter au chapitre VIII., p. 113 s.q., pour une appréciation plus complète des méthodes d'analyse et des formes de phosphore analysées.

4.2. EVALUATION DU POTENTIEL EN PHOSPHORE DU SOL PAR DES PROCEDES ANALYTIQUES

Le phosphore total du sol

Effectuée par attaque du sol par les acides forts (acide nitrique concentré bouillant pendant 5 heures pour la méthode française), l'analyse du phosphore total a permis un certain nombre de corrélations avec les rendements des cultures

Teneurs en P_2O_5 total et rendement des cultures

Sols ferrallitiques désaturés :

— 200 ppm de P_2O_5 total paraît être une teneur convenable pour le palmier à huile (MARTIN et PRIOUX, 1972),

— 600 ppm de P_2O_5 total semble un minimum pour la culture cotonnière en Côte d'Ivoire (LATHAM, 1971),

— 560 ppm de P_2O_5 total est une bonne valeur pour le cacaoyer en Côte d'Ivoire dans des sols de pH 5,0 (JADIN, 1972),

— 400 ppm de P_2O_5 total est une valeur minimale pour le cocotier (MANCIOT, OLLAGNIER et OCHS, 1979).

Sols d'Amérique Centrale et des Antilles :

— 85 à 100 ppm de P_2O_5 total serait une teneur suffisante pour le bananier d'après HARDY, cité par OSBORNE et HEWITT (1963), pour des sols qui ne sont pas tous ferrallitiques, loin de là.

Echelles de fertilité avec P_2O_5 total

On en citera deux concernant la Côte d'Ivoire. MOULINIER (1962) compare rendements en cacao et teneur en P_2O_5 total des sols ferrallitiques fortement désaturés dérivés de schistes et BERGER (1964) établit une échelle de fertilité en culture cotonnière dans des sols faiblement et moyennement désaturés, de fertilité moyenne, où le taux d'azote en surface varie de 0,8 à 1,4 °/oo tandis que le pH reste faiblement acide (6,3 à 6,5) (tableau XII.6.).

TABLEAU XII.6. — *Echelles de fertilité pour P_2O_5 total (Côte d'Ivoire)*

Rendements en cacao et teneur en P_2O_5 total du sol (d'après MOULINIER, 1962)		Echelle de fertilité en culture cotonnière pour le P_2O_5 total du sol (d'après BERGER, 1964)	
P_2O_5 total °/oo	Rendement en cacao kg/ha	P_2O_5 total °/oo	Appréciation de la fertilité
0,15	100	$<$0,4	Sol pauvre
0,25	300	0,4 à 0,7	Sol médiocre
0,35	600	0,7 à 0,9	Sol moyen
0,45	800	$>$0,9	Sol riche

Discussion

On peut remarquer la disparité des chiffres ci-dessus. En contrepoint de l'opinion de CULOT et LAUDELOUT (1957) qui déclarent qu'au Zaïre le phosphore total donne de meilleures corrélations avec les rendements des cultures que le phosphore assimilable (ici le P acido-soluble TRUOG), on peut citer LATHAM (1971) qui reconnaît qu'en Côte d'Ivoire la liaison entre rendements en coton-graines et phosphore total est assez floue et, surtout, celle de OSBORNE et HEWITT (1963) qui constatent que les chiffres donnés par HARDY pour les sols à bananier d'Amérique Centrale ne s'appliquent que très mal à cette culture à la Jamaïque.

Effectivement, les résultats, fort utiles, de ces travaux sur le phosphore total ne sont valables que pour un type de sol déterminé et tout particulièrement pour des teneurs équivalentes en matières organiques.

Ainsi que le montre la grande variabilité des chiffres répertoriés plus haut, une généralisation d'ensemble s'avère extrêmement délicate. Le phosphore total, tel qu'il est mesuré, inclut des formes de phosphore difficilement accessibles aux plantes ; or, d'un type de sol à l'autre, les proportions entre formes assimilables et formes non assimilables peuvent varier très sensiblement (1) ; par contre, elles restent souvent assez constantes à l'intérieur d'une même unité de sol.

Ajoutons, en guise de conclusion, que la considération du rapport N total/P_2O_5 total (chap. XI., p. 240-242) peut aider grandement à utiliser les analyses de phosphore total de façon rationnelle. C'est ainsi qu'en Côte d'Ivoire, les teneurs critiques de phosphore total (P_2O_5) pour la culture du cotonnier et du maïs sont de 0,5 °/oo et 0,7 °/oo lorsqu'il y a dans le sol respectivement 1 et 1,4 °/oo d'azote total (DABIN, 1979).

(1) Se plaçant presque à l'échelle planétaire, DABIN (1979) précise que, dans les sols des tropiques à fort degré d'altération, on observe des pourcentages assez constants entre les différentes formes de phosphore pour des types de sols donnés :
- Formes actives (Psol., PAl, PCa, PFe) 10 à 20 % du total
- Formes organiques 10 à 30 % du total
- Formes d'inclusions et résiduelles 50 à 80 % du total

ce qui, d'un sol à l'autre, peut représenter des plages de variations considérables.

Le phosphore acido-soluble

Les méthodes analytiques les plus courantes sont en ce domaine la méthode TRUOG et la méthode North Carolina.

La méthode TRUOG

Elle fut très utilisée par les agronomes francophones et anglophones en Afrique et en Asie jusque vers 1965, et paraît maintenant à peu près abandonnée ; elle avait permis à FORESTIER (1960) de fixer, dans les sols avec 30 % d'éléments fins (argile + limon granulométriques), à 15 ppm la teneur minimale en phosphore assimilable nécessaire pour les caféiers Robusta en République Centrafricaine, limite qui peut descendre à 10 ppm pour les sols à 10 % d'éléments fins ; ROCHE (1967) mentionne un emploi important de cette méthode à Madagascar. Ces quelques succès ne doivent pas faire oublier les efforts et l'argent gaspillés en pure perte pendant 30 ans, la méthode TRUOG apparaissant maintenant totalement inadaptée aux sols situés sous les tropiques qui sont le plus souvent à réaction acide et fortement acide.

La méthode North Carolina

Utilisant le réactif de MEHLICH HCl.0,05 N + H_2SO_4.0,25 N, cette méthode fut introduite en Amérique Latine par l'Université nord-américaine de ce nom et elle y est toujours très utilisée. Elle y fait souvent figure de méthode officielle. MALAVOLTA (1976) a répertorié les échelles de fertilité établies par les agronomes brésiliens grâce à cette méthode (tableau XII.7.).

TABLEAU XII.7. — *Fertilité et phosphore par la méthode North Carolina dans le sud et le centre-est du Brésil (MALAVOLTA, 1976)*

Appréciation de la fertilité	Rio Grande do Sul (1969)		GARGANTINI et *al.* (1970)	PIPAE M.G., 1972 Com. Est. Fert.	VAN RAIJ 1975
	sols sableux ppm	sols argileux ppm	me/100 g (ppm)	1973 - ppm	µg/ml
Très basse	0-10	0-4	—	—	0-3
Basse	10,1-20	4,1-8	<0,10 (10)	<10	4-7
Moyenne	20,1-30	8,1-12	0,11-0,30 (11-31)	11-30	8-15
Bonne	>30	>12	>0,30 (31)	>30	16-30
Très bonne	—	—	—	—	>31

Pour les mêmes raisons que la méthode TRUOG, la méthode North Carolina est actuellement très discutée au Brésil (VAN RAIJ, 1978). On lui reproche de n'extraire que les formes solubles dans les acides faibles (essentiellement P-soluble et P-Ca) mal représentées — et pas toujours représentatives du phosphore assimilable — dans les sols acides (pH inférieur à 6), riches en fer, si largement répandus entre les tropiques.

Phosphore acido-soluble avec complexation

La méthode DYER

Utilisée autrefois par DABIN et LENEUF (1960) dans les sols de bananeraies de Côte d'Ivoire, elle est parfois reprise épisodiquement (GODEFROY, 1974) dans les mêmes

conditions. Manquant de sensibilité aux teneurs habituelles de phosphore des sols ferrallitiques, elle ne donne de résultats significatifs qu'en sols fortement enrichis en phosphore par des applications de phosphates.

Les différents réactifs de BRAY

Ces réactifs, principalement BRAY N° 2, sont surtout employés dans les pays tropicaux anglophones. On trouvera dans le tableau XII.8. deux échelles de fertilité, dont l'une (rizières d'Indonésie) ne concerne pas, selon toute vraisemblance, des sols ferrallitiques mais est donnée ici à titre de comparaison.

TABLEAU XII.8. — *Echelles de fertilité pour le phosphore assimilable* BRAY

Echelle de fertilité pour le phosphore BRAY N° 2. Rizières de Java et Sumatra HORN (1971)		Limitations agricoles pour le phosphore (total et BRAY N° 2) d'un sol avant défrichement. Palmier à huile - Surinam FAO (1976)		
Fertilité	P ppm	Limitations	P_2O_5 total °/oo	P Ass. BRAY N° 2 ppm
Très faible	<40	Nulle à légère	<0,125	<3
Faible	41-60			
Moyenne	61-80	Modérée	>0,125	>3
Bonne	81-100			
Très bonne	<100			

Notons que ROCHE et *al.* (1978) fixent à 13 ppm le seuil critique de phosphore assimilable BRAY N° 2 pour un ensemble de 42 sols ferrallitiques.

On peut faire à ce groupe de méthodes le même reproche que pour le groupe précédent : elles ne sont guère utilisables que pour des pH du sol proches de la neutralité (pH de 6,0 à 7,5) ou des sols enrichis en phosphore (DYER) ; elles se révèlent sans grand intérêt pour les sols acides (pH < 5,5), surtout s'ils sont riches en fer. A titre de confirmation, BOWER (com. pers.) constate que les réactifs de BRAY donnent des résultats peu satisfaisants dans les sols du Sud-Est asiatique dont un certain nombre sont à réaction fortement acide.

C'est vraisemblablement pour la même raison — chiffres de phosphore assimilable BRAY N° 2 très faibles parce qu'obtenus en sol très acide — que l'échelle établie par la FAO au Surinam prend également en compte le phosphore total.

Le phosphore alcalino-soluble

Il s'agit souvent des méthodes d'OLSEN et *al.* (1954) et de SAUNDER (1956) qui utilisent comme réactifs d'extraction le bicarbonate de sodium semi-molaire dans le premier cas, la soude diluée 0,1 N à chaud dans le second. DALLAL (1973) a réalisé une combinaison de ces deux méthodes en employant comme solution d'extraction 0,25 M . NaOH + 0,1 M . Na_2CO_3.

La méthode SAUNDER a suscité, pendant quelque temps, un grand intérêt en Afrique Orientale, à Madagascar et en Afrique francophone. Elle semble actuellement un peu délaissée au profit de la méthode OLSEN qui recueille les faveurs d'un nombre grandissant d'agronomes et chimistes du sol (VAN RAIJ, 1978). Moins brutale que SAUNDER, OLSEN tient également compte du fait que, dans les sols acides situés sous les tropiques, le phosphore se trouve en majorité sous des formes combinées à l'aluminium et surtout au fer.

C'est dans ces types de sols que ces méthodes (SAUNDER et OLSEN) donneront les meilleurs résultats.

Calculant des corrélations entre rendements en maïs et phosphore assimilable SAUNDER sur sols ferrallitiques dérivés de gabbros de Côte d'Ivoire, PICHOT, LE BUANEC et *al.* (1978) situent vers 120-135 ppm de P la valeur critique de ce phosphore assimilable, ce que confirment à peu près (intervalle de 70 à 180 ppm) ROCHE et *al.* (1978) pour un ensemble beaucoup plus large de sols ; sur le même échantillonnage de sols, ces derniers auteurs voient varier le phosphore assimilable DALLAL de 50 à 140 ppm.

De leur côté, MANCIOT, OLLAGNIER et OCHS (1979) établissent à 100 ppm le seuil de phosphore assimilable SAUNDER pour les sols littoraux très sableux consacrés au cocotier, ce qui rejoint les chiffres trouvés pour les sols ferrallitiques par ROCHE et *al.* (op. cit.).

Phosphore alcalino-soluble et phosphore complexé par le fluorure d'ammonium – Méthode BONDY

La méthode dite de Bondy (ou OLSEN modifiée DABIN) consiste à attaquer le sol en une seule fois par un mélange de bicarbonate de sodium et de fluorure d'ammonium à pH 8,5, méthode mise au point dans les laboratoires de l'ORSTOM à Bondy (DABIN, 1967).

On extrait par ce moyen la totalité du phosphore soluble et du phosphore lié au calcium et à l'aluminium, une partie du phosphore lié au fer (probablement la fraction la moins fortement complexée) et certainement aussi un peu de phosphore organique, ce qui représente, somme toute, ce que l'on considère habituellement comme assimilable par les plantes (sauf la fraction organique qui n'est utilisable qu'à terme).

On constate que le seuil de carence, dans les sols à faible pouvoir de fixation de Côte d'Ivoire, se situe entre 25 et 30 ppm de phosphore extrait par cette méthode, à la fois pour le cotonnier (LATHAM, 1971 ; BOUCHY, 1973) et pour diverses cultures vivrières (LE BUANEC, 1973), ainsi que pour le palmier à huile et le cocotier (MANCIOT, OLLAGNIER, OCHS, 1979).

Lorsque le sol possède un certain pouvoir fixateur, il semble préférable de placer ce seuil critique entre 50 et 100 ppm de P assimilable. C'est à un résultat de cet ordre de grandeur – 60 à 70 ppm – que parviennent PICHOT, LE BUANEC et *al.* (1978) pour une culture de maïs sur sol ferrallitique remanié de Côte d'Ivoire (ce sol, provenant de l'altération de roches basiques, contient une proportion importante de composés ferrugineux).

Par contre, on connaît mal ce qui se passe dans les sols à très fort pouvoir fixateur, qui, chez les ferrallitiques, sont des sols très riches en fer hautement réactif.

En première approximation, si l'on ne possède aucune détermination du pouvoir fixateur des sols, on peut suivre ROCHE et *al.* (1978) lorsqu'ils attribuent aux sols ferrallitiques 50 ppm de P comme valeur moyenne du seuil critique de phosphore assimilable Bondy.

Une estimation du potentiel phosphorique doit également utiliser l'équilibre N total/ P_2O_5 assimil. (ici compris entre 10 et 20). Certains agronomes (BOUCHY, 1973) trouvent même que ce rapport donne une meilleure approximation de la fertilité que la simple considération des valeurs absolues de phosphore, à condition, bien sûr, que le sol contienne assez de phosphore pour se situer au-dessus des valeurs-seuil définies plus haut.

Phosphore isotopique – valeur L de LARSEN

La méthode isotopique est souvent considérée comme la méthode de référence par excellence (VAN RAIJ, 1978 ; DABIN, 1979 ; etc.). Elle est malheureusement assez peu utilisée en raison de quelques défauts spécifiques (Cf. chap. VIII, p. 121) et surtout de la longueur de sa mise en œuvre.

Des valeurs allant de 15 à 40 ppm de P pour la valeur L de LARSEN sont assez souvent citées pour caractériser un minimum compatible avec les cultures. ROCHE et *al.* (1978) estiment que 25 ppm de P pour la valeur L coïncident assez bien avec le seuil critique « moyen » pour le phosphore dans les sols ferrallitiques.

A la suite d'un essai d'engrais sur maïs, dans la région de Man en Côte d'Ivoire, PICHOT et *al.* (1978) placent la teneur-limite L de LARSEN vers 30-35 ppm, ce qui correspond ici à 60-70 ppm de P assimilable Bondy et à 120-135 ppm de P assimilable SAUNDER. Il s'agit là d'un sol ferrallitique faiblement désaturé, riche en fer, considéré comme ayant un fort pouvoir fixateur pour le phosphore.

4.3. DISCUSSION

Ainsi qu'on l'a vu précédemment à propos des facteurs de LARSEN (chap. VIII., p. 189-190), c'est encore le facteur quantité qui donne, en pratique, les meilleures corrélations avec la nutrition phosphorique des plantes, d'où l'intérêt des déterminations du phosphore total ou assimilable telles qu'elles viennent d'être exposées.

Mais il faut bien constater que la multiplicité des méthodes d'analyse du phosphore du sol cache un grave handicap : leur difficulté à bien rendre compte dans tous les cas du phosphore réellement disponible pour la plante.

Pour arriver à une meilleure approximation que celle donnée par le chiffre brut de phosphore (assimilable surtout, parfois total), il semble qu'il faille combiner ce dernier avec son environnement dans le sol : équilibre avec d'autres éléments et considération du pouvoir fixateur :

Equilibre avec d'autres éléments

L'équilibre le plus important du phosphore avec d'autres ions ou cations est celui qu'il réalise avec l'azote total du sol, le seul d'ailleurs qui soit chiffré. Cette question ayant été traitée au chapitre XI. p. 240, rappelons simplement les limites de validité de ces équilibres :

— Avec P total (HNO_3 concentré) $\quad 2 < \frac{N}{P_2O_5} < 4$

— Avec P assimilable (Bondy) $\quad 10 < \frac{N}{P_2O_5} < 20$

Pouvoir fixateur des sols

On a vu précédemment que la teneur critique en phosphore assimilable Bondy variait assez largement selon que le sol possédait un pouvoir fixateur fort, moyen ou faible. Or ces appellations recouvrent en réalité une grande imprécision que ROCHE et *al.* (1978) ont tenté de lever en utilisant le pouvoir fixateur I_L de GACHON (1966), mais sans donner de chiffres précis (on trouvera au chapitre IX., p. 181-182, à propos du pouvoir fixateur du sol pour le phosphore, des données numériques qui peuvent, peut-être, servir à préciser les idées du lecteur).

Même en présence d'une échelle chiffrée du pouvoir fixateur, il importe à l'agronome et au pédologue de se faire sur le terrain une idée de l'intensité avec laquelle le sol va, sinon bloquer, du moins immobiliser partiellement le phosphore des engrais mis pour pallier d'éventuelles carences, ou tout simplement à titre de fumure annuelle. Pour cela, on peut admettre, en première approximation, que le pouvoir fixateur des sols résulte de l'abondance des oxydes et des hydroxydes de fer (et d'aluminium) ainsi que du pH. De telle sorte que ce seront en premier lieu les sols issus de roches basiques (riches en fer) qui

auront, toutes choses égales par ailleurs, un pouvoir fixateur généralement plus élevé que les sols issus de roches acides, mais sans qu'il soit possible d'ériger cette constatation empirique en postulat.

Quant au rôle du pH, il faut se souvenir que plus la réaction du sol penche vers l'acidité, moins P-Al et P-Fe (de CHANG et JACKSON) se trouvent disponibles pour les cultures. Pour des pH inférieurs à 5, la présence d'aluminium échangeable (antagoniste du phosphore, rappelons-le) est un facteur supplémentaire d'insolubilisation — et de non-utilisation par les plantes — du phosphore présent dans le sol.

Bien qu'elle ne puisse pas elle-même donner une estimation complète et sûre de la fertilité phosphorique des sols, sauf si l'on connaît bien « son » terroir, la détermination du phosphore total reste tout de même un élément d'appréciation souvent fort utile ; elle le sera, en particulier, dans les sols déficients en phosphore, où les quantités de phosphore assimilable sont tellement faibles que les valeurs obtenues en laboratoire n'ont pas toujours grande signification (chiffres à peine supérieurs aux erreurs d'analyse). Sa considération permet néanmoins d'apprécier les réserves en phosphore, donc un potentiel, mais dont on n'est pas sûr qu'il soit exploitable facilement.

En le comparant au phosphore assimilable, on a un moyen d'apprécier dans quelles proportions il est susceptible d'alimenter les plantes. Ainsi l'école française (DABIN, com. pers.), en confrontant les chiffres de phosphore total extrait à l'acide nitrique bouillant et de phosphore assimilable Bondy, estime-t-elle qu'une proportion de phosphore assimilable voisine du dixième du phosphore total est le signe d'un passage aisé des réserves vers la solution du sol, donc d'un phosphore total relativement bien disponible à terme.

Le rapport P assim./P total permet ainsi de dresser une échelle approximative empirique du pouvoir fixateur du sol :

$\frac{\text{P assim.}}{\text{P total}} < \frac{1}{20}$ sol à faible pouvoir fixateur

$\frac{1}{20} < \frac{\text{P assim.}}{\text{P total}} < \frac{1}{40}$ sol à pouvoir fixateur moyen

$\frac{\text{P assim.}}{\text{P total}} > \frac{1}{40}$ sol à fort pouvoir fixateur

5. POTASSIUM

5.1. GENERALITES

Le potassium est le troisième des trois « grands » de la fertilisation classique NPK telle qu'elle fut définie par les agronomes du XIX^{e} siècle. L'intensité des besoins des plantes pour cet élément lui confère une place à part parmi les cations alcalins et alcalino-terreux du sol (Ca, Mg, K, Na) où, logiquement, on doit le ranger. Il faut ajouter qu'aux teneurs relativement faibles auxquelles on le trouve habituellement dans les sols, il n'a pratiquement aucune influence sur la structure, contrairement au calcium et au magnésium (et aussi au sodium s'il n'était pas en quantités infimes dans les sols ferrallitiques).

On a vu à propos de sa dynamique (chap. X., p. 193 s.q.) que le potassium échangeable n'était pas la seule forme que les plantes pouvaient assimiler et qu'en outre, ce potassium échangeable était susceptible de se régénérer à partir des réserves constituées par du potassium non-échangeable. Malgré tout, lorsque chimistes du sol et agronomes cherchent à évaluer les disponibilités immédiates du sol en potassium, c'est à la notion de potassium

échangeable qu'ils font appel. Outre que cette forme est facile à mesurer, elle paraît bien représenter la fraction du potassium du sol la plus facilement accessible aux racines et, en définitive, elle se relie assez bien aux disponibilités immédiates en cet élément.

En plus des renseignements donnés par les échelles de fertilité, on s'accorde à reconnaître (BOYER, 1972 et 1973) qu'il existe pour le potassium un seuil critique relatif et un seuil critique absolu de carence et de déficience.

5.2. SEUIL CRITIQUE RELATIF (LIMITATION FORTE A MOYENNE)

Ce seuil relatif de carence peut s'exprimer de deux façons :

Par rapport à la capacité d'échange T

Le potassium échangeable doit représenter au moins 1,5 % de la capacité d'échange :

$$\frac{K}{T} \times 100 \geqslant 1{,}5 \quad .$$

Cette valeur critique fut déterminée par TINKER (1959) dans les sols sableux (en surface) du Nigéria méridional plantés en palmiers à huile, et confirmée par FORDE, LEYRITZ et SLY (1966) toujours au Nigéria. CHAMINADE (1963) considère comme un optimum une teneur en potassium échangeable représentant 2 à 3 % de la capacité d'échange, ceci pour l'ensemble de l'Afrique francophone et de Madagascar.

Par rapport à la somme des bases échangeables

VALLANCE (1951) trouve que, dans les sols du Queensland australien, il faut pour la canne à sucre que le potassium échangeable soit au minimum égal à 2 % de la somme des bases échangeables, suivi par DABIN (1961) pour les sols de l'Afrique de l'Ouest :

$$\frac{K \text{ éch.}}{SBE} \times 100 \geqslant 2$$

Conditions d'utilisation de ces seuils critiques relatifs

Il paraît évident que l'on utilisera $\frac{K}{T}$ dans les sols très désaturés, tandis que $\frac{K}{SBE}$ sera sans doute plus approprié dans les sols convenablement saturés en bases.

Toutefois, l'emploi de $\frac{K}{T}$ dans les sols ferrallitiques très fortement désaturés peut se révéler illusoire si on mesure la capacité d'échange à pH 7 sans tenir compte de l'aluminium échangeable (W.A.I.F.O.R., 1960-1961).

A noter que l'importance des rapports K/T et K/SBE n'est pas propre aux sols ferrallitiques, puisque BLANCHET (1959) et CHAMINADE (1963) conseillent son emploi pour tous les types de sols, y compris les sols tempérés. D'ailleurs, dans ces derniers, on considère que le potassium échangeable doit représenter entre 3 et 5 % — et de préférence plus près de 5 % que de 3 % — de la capacité d'échange, au moins dans les riches vergers du sud de la France (CRAHET, 1958). Cette disparité avec les chiffres cités plus haut est évidemment une conséquence de l'intensification des cultures en Europe. Aux mêmes causes, les mêmes effets : GUILLEMOT, LACHENAUD et DORMOY (1973) conseillent vivement de porter à 5 % de la capacité d'échange la teneur en potassium échangeable des sols de bananeraie de la Martinique.

On peut conclure en termes de limitations :

$\frac{K}{T} < 1{,}5\ \%$ et $\frac{K}{SBE} < 2\ \%$	limitation forte
$1{,}5 < \frac{K}{T} < 3\ \%$	limitation moyenne à faible
$\frac{K}{T} > 3\ \%$	limitation faible à nulle

Equilibres Mg/K, $\frac{Ca + Mg}{K}$ et rapports $\frac{K}{T}$ et $\frac{K}{SBE}$

Lorsqu'on applique les normes définies pour les équilibres Mg/K et $\frac{Ca + Mg}{K}$ (Chap. XI., p. 247 à 251), on vérifie automatiquement si l'on se trouve ou non dans les limites de confiance du rapport $\frac{K}{SBE}$ et $\frac{K}{T}$. De telle sorte que ce concept de seuil critique relatif fait un peu double emploi avec la notion d'équilibre.

5.3. SEUIL CRITIQUE ABSOLU

Seuil absolu de carence

Un très grand nombre d'agronomes ont montré que les teneurs du sol inférieures à 0,10 mé pour 100 g de sol engendrent, dans la plupart des cas, des déficits importants de récolte et souvent des maladies de carence ; ce chiffre de 0,10 mé pour 100 g doit être affecté d'un coefficient 0,5 à 0,7 pour les sols sableux (argile + limon < 15 %) et d'un coefficient 2 pour les sols très argileux (argile + limon > 45 %). Et s'il est une valeur abondamment vérifiée de par le monde, c'est bien ce chiffre de 0,10 mé de potassium échangeable pour 100 g de sol, et ceci pour pratiquement toutes les cultures, non seulement dans les sols ferrallitiques, mais pour tous les sols ayant la kaolinite comme argile dominante (1).

Seuil absolu de déficience ou de non-réponse aux engrais

Supposons un sol qui se trouve exactement au seuil critique de carence, c'est-à-dire à 0,10 mé de K échangeable pour 100 g de sol : si on augmente la teneur en potassium échangeable par des apports d'engrais, les rendements des récoltes augmentent rapidement d'abord, puis lentement jusqu'à un seuil dit de déficience ou de non-réponse aux engrais. Ce seuil s'échelonne habituellement de 0,14 à 0,35 mé/100 g en fonction de la nature du sol et du type de plante.

Pour illustrer ceci, on peut commenter, entre autres, l'exemple fourni par RODRIGUEZ (1973) à propos de la fumure du Coffea arabica en Colombie : les engrais potassiques commencent par augmenter très vigoureusement le volume des récoltes tant que la teneur

(1) Ces règles s'appliquent parfois assez mal dans les sols ayant en proportions importantes des argiles du type illite, vermiculite et montmorillonite en raison des phénomènes de rétrogradation du potassium qui s'y produisent. C'est rarement le cas en milieu ferrallitique.

du sol est comprise entre 0,10 et 0,15 mé/100 g de K échangeable ; pour des valeurs de K échangeable supérieures à 0,15 mé/100 g, l'action des engrais potassiques diminue progressivement d'intensité et finit par s'annuler pour K= 0,30 mé/100 g. Au-dessus de cette valeur du potassium échangeable, il est inutile de fournir de la potasse au sol, car elle ne fait plus progresser les rendements. 0,30 mé/100 g de K est dont le seuil de déficience ou de non-réponse aux engrais pour le caféier.

Le seuil de déficience pour le potassium est généralement moins élevé pour la plupart des plantes poussant sous les tropiques : 0,14 mé/100 g pour l'arachide, 0,18 mé/100 g pour le palmier à huile en Afrique Occidentale, de telle sorte que 0,20 mé/100 g est une valeur moyenne le plus souvent acceptable (VAN RAIJ, 1974), bien que parfois jugée un peu forte (MIELNICZUK, 1977, adopte 0,15 mé/100 g pour le sud du Brésil).

Influence de la granulométrie du sol

On a vu précédemment qu'il fallait affecter d'un certain coefficient la valeur du potassium échangeable au seuil critique en fonction de la granulométrie du sol. En fait, si l'on veut aller au fond des choses, l'alimentation potassique des plantes dépend de la vitesse de passage du potassium du complexe absorbant vers la solution du sol ; certains ions, comme l'ammonium et surtout l'aluminium échangeable, peuvent la diminuer, mais il semble que la teneur en éléments fins du sol soit l'un des facteurs qui influent sur cette vitesse de transfert : aussi, FORESTIER (1964) module-t-il de la façon suivante les teneurs limite en potassium pour le Coffea canephora Var. Robusta dans les sols ferrallitiques de la République Centrafricaine :

Argile + limon	Teneurs-limite en K échangeable (carence)
10 %	0,05 mé/100 g
35 %	0,10 mé/100 g
70 %	0,40 mé/100 g

5.4. LIMITATIONS AGRICOLES DUES AU POTASSIUM ECHANGEABLE

On s'est efforcé de synthétiser ici sur un même tableau les données déjà indiquées pour les divers seuils afin de dresser un schéma des limitations ou contraintes agricoles engendrées par le potassium (tableau XII.9.).

Les chiffres mentionnés sur le tableau XII.9. sont des valeurs moyennes, qui, par définition, ne s'adaptent pas forcément à une culture précise. En outre, le bon sens indique qu'un sol avec A + L = 16 % et un autre avec A + L = 42 %, bien que regroupés ici dans la même catégorie, présenteront des propriétés voisines de celles des sols sableux pour le premier et des sols argileux pour le second. Il faudra donc tenir compte des intermédiaires.

Malgré ces imperfections, cette échelle des limitations culturales en fonction des teneurs en potassium échangeable et du taux d'éléments fins des sols peut permettre à l'agronome et au pédologue d'apprécier, avec une assez bonne approximation, le potentiel potassique de leurs sols.

Le prospecteur chargé d'estimer les capacités d'un sol non cultivé couvert de végétation naturelle, devra en plus tenir compte du potassium contenu dans le manteau végétal (cf. chap. VII., p. 92-96) et, le cas échéant, déconseiller tel ou tel mode de défrichement susceptible de priver le sol de cet apport souvent indispensable aux sols ferrallitiques très désaturés.

TABLEAU XII.9. — *Limitations culturales et teneurs en potassium échangeable (K échangeable en milliéquivalent pour 100 g de sol)*

K échangeable mé/100 g / Granulométrie	Limitation très forte à forte	Seuil de carence	Limitation moyenne à faible	Seuil de déficience	Limitation très faible à nulle
Sols sableux (A + L < 15 %)	< 0,05-0,07		0,07-0,14		> 0,14
Sols dits à texture équilibrée 15 % < A+L < 45 %	< 0,10		0,10-0,20		> 0,20
Sols argileux A + L > 45 %	< 0,20		0,20-0,40		> 0,40

A = argile ; L = limon ; % pourcentages donnés par l'analyse granulométrique.

5.5. QUELQUES ECHELLES DE FERTILITE POUR LE POTASSIUM ECHANGEABLE

Les échelles de fertilité sont habituellement établies dans un but précis et pour une culture déterminée, d'où quelques variations par rapport au schéma général des limitations indiqué ci-dessus.

TABLEAU XII.10. — *Deux échelles de fertilité pour le potassium échangeable*

Côte d'Ivoire		Australie (Queensland)	
Echelle de fertilité pour la culture bananière en sols ferrallitiques et hydromorphes DABIN et LENEUF (1960)		Echelle de fertilité pour la culture de la canne à sucre VALLANCE (1951)	
< 0,1	Faible	< 0,10	Très faible
0,1 à 0,20	Médiocre	0,10 à 0,12 avec K < 2 % SBE	Faible
0,20 à 0,40	Moyenne	0,12 à 0,18 avec K > 2 % SBE	Moyenne
0,40 à 0,60	Bonne		
> 0,60	Très bonne	> 0,18	Bonne

C'est parfois avec la productivité de chaque culture dans les mêmes sols qu'on établit une échelle de fertilité ; ainsi, VAN RAIJ (1974) pour le cotonnier, le haricot et la canne à sucre dans l'Etat de São Paulo au Brésil (tableau XII.11.).

TABLEAU XII.11. — *Potassium échangeable et fertilité pour trois cultures*
Etat de São Paulo — Brésil
VAN RAIJ (1974)

Cotonnier		Haricot		Canne à sucre		Fertilité
K éch. mé/100 g	Rendement kg/ha	K éch. mé/100 g	Rendement kg/ha	K éch. mé/100 g	Rendement T/ha	
< 0,06	—	> 0,07	—	< 0,04	—	Très faible
0,07-0,09	1 210	0,08-0,11	—	0,05-0,08	108,7	Faible
0,10-0,15	—	0,12-0,17	1 325	0,09-0,21	113,5	Moyenne
0,16-0,24	2 400	0,18-0,24	1 516	> 0,21	156,0	Bonne
> 0,24	2 397	> 0,24	1 455			Très bonne

5.6. DISCUSSION : POTASSIUM DEVENANT ASSIMILABLE A TERME

Qu'il s'agisse du tableau XII.9. indiquant les limitations culturales ou des échelles de fertilité, seul le potassium échangeable entre en jeu. Or c'est une donnée statique parfois valable seulement pour une saison de culture.

On sait (cf. chap. X., p. 198) que le potassium échangeable n'est pas la seule forme que les plantes puissent utiliser et, surtout, qu'il peut se régénérer à partir des réserves, phénomène dont on a vu précédemment toute l'importance.

Aussi a-t-on cherché à estimer le potassium susceptible de devenir assimilable à court et moyen terme. L'une des approches est celle de l'école anglaise à la suite des travaux de BECKETT (1964) ; mais jusqu'à présent, il semble encore difficile de fixer des normes précises avec les chiffres obtenus par différents chercheurs qui ont appliqué ces processus analytiques. En fait, la méthode de BECKETT, perfectionnée par TINKER (1964) pour les sols ferrallitiques acides, ne mesure en définitive que le facteur Quantité LARSEN, c'est-à-dire un potassium assimilable au même titre que le potassium échangeable. SING (1971) a cherché dans quelle mesure ces méthodes pouvaient le mieux rendre compte d'un apport de chlorure de potassium dans la partie superficielle (0-15 cm) d'un sol à hévéa de Malaisie ; la sensibilité varie de la façon suivante d'après cet auteur :

« Intensity > Quantity > exchangeable K »

En fait, les courbes de variation du potassium échangeable sont strictement parallèles à celles obtenues par la méthode « Quantity/Intensity », ce qui confirme le jugement émis plus haut.

Plus ancienne est la tentative d'extraire par les acides forts dilués (à chaud ou à froid) un potassium que l'on suppose assimilable à plus ou moins long terme. L'extraction à l'acide chlorhydrique semble avoir été systématiquement utilisée sur les sols de Malaisie (COULTER, 1972), sans qu'il en ait résulté, selon toutes apparences, des valeurs de seuils ou des échelles aisément applicables.

Par contre, avec l'emploi de HNO_3.N bouillant, METSON (1968) fixe à K = 0,35 mé/100 g la limite du potassium ainsi extrait pour qu'il n'apparaisse pas de déficience potassique à moyen terme dans les sols de Nouvelle Zélande. MIELNICZUK (1977) paraît adopter cette norme pour le Brésil et il constate que, sur 81 échantillons répartis sur l'ensemble de ce pays, 60 % possèdent un K non-échangeable — NO_3H.N inférieur à 0,35 mé/100 g (l'auteur ne dit pas si ce pourcentage correspond à une déficience réelle constatée sur le terrain).

On peut ajouter que l'extraction à HNO_3 concentré bouillant d'un potassium improprement appelé « potassium total » (c'est en fait une réserve « agronomique ») n'a pas

permis jusqu'à présent à l'école francophone de déterminer des normes acceptables pour l'ensemble des sols ferrallitiques.

TABLEAU XII.12. — *Potassium et limitations agricoles (en sol couvert de forêt) pour le palmier à huile au Surinam FAO (1976)*

Limitations	K total 0-50 cm mé/100 g	K échan. 0-50 cm mé/100 g	C.E.C. 0-50 cm mé/100 g
Nulle à légère	> 10,6	> 0,06	> 3
Modérée	< 10,6	< 0,06	1 à 3
Forte à très forte	—	—	< 1

A titre de conclusion, retenons les limitations établies par la FAO (1976) pour le palmier à huile au Surinam (tableau XII.12). Il faut souligner qu'il s'agit de la tranche de sol de 0 à 50 cm (et non pas de l'horizon superficiel humifère de 10 à 20 cm de profondeur, comme partout ailleurs), ce qui explique le chiffre assez faible de K échangeable. On peut remarquer qu'en sol couvert de forêt, la carence en potassium seul n'engendre pas de « fortes » limitations agricoles en raison de l'apport extrêmement important que l'on peut attendre de la destruction de la végétation originelle, qu'elle soit incinérée ou andainée à intervalles rapprochés comme cela se fait communément pour la préparation des plantations de plantes pérennes.

6. MAGNÉSIUM, CALCIUM ET SOMME DES BASES ECHANGEABLES

6.1. GENERALITES

Avec le calcium et le magnésium, on a affaire à des éléments pour lesquels les besoins des plantes se réduisent beaucoup par rapport à ceux qu'elles manifestent pour l'azote, le phosphore et le potassium.

Dans la plupart des sols, même de fertilité moyenne, sols tempérés ou non, calcium et magnésium ne posent guère de problèmes, car ils existent en quantités suffisantes. Il n'en est pas toujours de même dans l'immense domaine des sols ferrallitiques : si certaines régions comme l'Afrique Occidentale et Centrale (au Nord de l'Equateur) et les territoires marqués par un volcanisme récent (Indonésie, Antilles, Andes...) apparaissent favorisés, ces sols se caractérisent généralement par leur pauvreté chimique et bien souvent une désaturation avancée de leur complexe absorbant.

En ce qui concerne le magnésium, on peut mentionner l'opinion de COULTER (1972) suivant laquelle les sols de Malaisie sont pratiquement tous déficients en cet élément et celle de DE GEUSS (1967) qui considère que presque toutes les cultures arbustives et arborées d'Afrique Occidentale et Centrale en manquent peu ou prou. Ajoutons qu'au Brésil, on incite officiellement les agriculteurs à amender leurs sols uniquement avec des calcaires (ou des chaux) magnésiens, sinon des dolomies, et non pas avec des carbonates trop purs en calcium. Comme toujours, une généralisation de cette sorte se révèle abusive

dans certains cas, mais elle est symptomatique du sentiment qu'il existe une déficience en magnésium très fréquente dans les sols brésiliens.

Quant au déficit en calcium, il marque indirectement les sols en favorisant, entre autres inconvénients, les toxicités dues à l'aluminium si répandues dans le monde, en Amérique du Sud notamment (GUERRERO, 1975 ; OLMOS et CARMARGO, 1976 ; BOYER, 1976).

Il existe aussi, et fort heureusement, des sols convenablement pourvus en ces deux éléments.

Ce sera l'objectif de cet exposé de tenter de définir les seuils admissibles de magnésium et de calcium, les teneurs optimales lorsqu'il est possible de les préciser pour certaines cultures, et, enfin, de donner quelques échelles de fertilité lorsqu'on a pu les établir. Etant donné que calcium et magnésium représentent entre 60 et 95 % de la somme des bases échangeables, il sera fait appel également à cette notion.

6.2. SEUILS DE CARENCE ET DE DEFICIENCE POUR LE MAGNESIUM

Définition des seuils de carence et de déficience. Valeurs de ces seuils

Il paraît utile de préciser à nouveau qu'il y a carence lorsque la plante montre des signes évidents d'une maladie (généralement une chlorose des feuilles dans le cas du magnésium) ou encore donne des récoltes insignifiantes. Il y a déficience lorsqu'une plante, en apparence saine, réagit très favorablement à un apport de cet élément, tout au moins jusqu'à une certaine teneur du sol ; au-delà, toute fumure supplémentaire est inutile. C'est cette limite que l'on appelle seuil de déficience, qui est, en fait, un seuil de non-réponse aux engrais.

LOMBIN et FAYEMI (1975) ont parfaitement défini ces deux seuils à propos d'une culture de maïs faite en pots sur vingt-trois types de sols du Nigéria parmi lesquels 10 ferrallitiques (oxisols selon la Soil Taxanomy américaine) et 13 ferrugineux tropicaux au sens donné par d'HOORE dans sa carte des sols d'Afrique (7 alfisols et 6 ultisols suivant la classification américaine). Le seuil de carence s'établit à 0,17 mé/100 g de magnésium échangeable pour le maïs, limite au-dessous de laquelle les symptômes foliaires de malnutrition magnésienne apparaissent nettement. Quant au seuil de déficience (non-réponse aux engrais magnésiens), il s'échelonne entre 0,28 et 0,40 mé/100 g de magnésium échangeable suivant les sols et les cultures.

Un coup d'œil sur le tableau XII.13. permet de se rendre compte qu'il y a une convergence certaine des valeurs de magnésium échangeable tant pour les seuils de carence que pour les seuils de déficience, bien que l'on ait répertorié ces valeurs pour des plantes aussi différentes que le maïs et le palmier à huile ; ce qui n'exclut d'ailleurs pas des variations dans le détail.

Si l'on s'en tient à l'ordre de grandeur, il apparaît que les plantes sont fort peu exigeantes quant au magnésium échangeable fourni par le sol : la limite admissible de carence se situe entre 0,10 et 0,17 milliéquivalent de magnésium, tandis que le seuil de non-réponse aux engrais magnésiens s'étend à 0,25 et 0,40 mé/100 g suivant le cas. Ce chiffre de 0,40 mé/100 g de magnésium échangeable est d'ailleurs considéré au Brésil comme suffisant pour pratiquement toutes les cultures (il s'agit donc un peu d'une valeur « garde-fou », qui permet de se dispenser de prévoir une fumure magnésienne à court terme).

Toutefois, il semble certain que pour le bananier, très friand de magnésium, ces derniers taux sont un peu trop bas si l'on veut s'assurer des rendements convenables. Il pourrait en être de même pour le cacaoyer dans l'état de Bahia (Brésil) où CABALA-ROSAND et *al.* (1967) notèrent des réponses favorables à la dolomie jusqu'à une teneur du sol de 2 mé/100 g de magnésium échangeable ; très vraisemblablement, il s'agit là d'un chiffre un peu trop fort, de l'avis même des auteurs, si l'on s'en tient à l'action du magnésium « sensu stricto », car l'amendement calco-magnésien eut également pour effet de relever

un pH acide peu compatible avec une bonne croissance du Théobroma. C'est vraisemblablement pour une raison analogue (à moins qu'il ne s'agisse du rapport Ca/Mg ou Mg/K) que WU et SU (1965) ont constaté, dans un latosol de Formose, de très bonnes réponses de l'ananas à une fumure magnésienne alors que le sol contenait déjà 0,50 milliéquivalent de magnésium échangeable pour 100 g de sol.

Ces derniers exemples illustrent bien le fait que le magnésium du sol n'a pas simplement pour rôle d'alimenter la plante, mais qu'il a aussi pour fonction, avec le calcium, d'assurer au sol un certain nombre de caractéristiques physico-chimiques, dont le pH, qui conditionnent aussi le niveau des rendements des cultures.

TABLEAU XII.13. — *Seuils de carence et de déficience en magnésium échangeable pour quelques plantes en sols ferrallitiques*

Culture type de sol	Localisation	Seuil de carence mé/100 g	Seuil de déficience mé/100 g	Source
Maïs				
Ferrallitiques fortement désaturés	Madagascar	0,10	0,25-0,30	CELTON, ROCHE, VELLY (1973)
Ferrallitiques moyennement désaturés	République Centrafricaine	0,14	n.d.	PICHOT, TRUONG, BURDIN (1973)
Ferrallitiques (et ferrugineux tropicaux)	Nigéria	0,17	0,28-0,35	LOMBIN et FAYEMI (1975)
Cocotier				
Tous sols	Monde entier surtout Afrique	0,20	0,50 (?)	MANCIOT, OLLAGNIER et OCHS (1979)
Bananier				
Sols ferrallitiques et andosols	Antilles	0,15	n.d.	COLMET-DAAGE et *al.* (1970)
Palmier à huile				
Ferrallitiques fortement désaturés	Nigéria	0,15	n.d.	TINKER et SMILDE (1963)
	Côte d'Ivoire	n.d.	< 0,35	SURRE et ZILLER (1963)
	Monde entier surtout Afrique	0,15	0,40	OLLAGNIER, OCHS, MARTIN (1970)
Hévéa				
Latosol acide	Malaisie	0,10 à 15	n.d.	BOLTON et SHORROCKS (1961)
Caféier Robusta				
Sols ferrallitiques fortement désaturés	Côte d'Ivoire	n.d.	0,25	LOUE (1957)

Importance de la teneur en éléments fins du sol sur les valeurs des seuils de carence et de déficience en magnésium

L'examen du tableau XII.13. montre que même pour une seule plante, le maïs, il existe une variabilité très importante dans les données chiffrées des seuils de carence

(surtout) et de déficience, variabilité qu'il semble difficile d'imputer à des besoins différents des divers clones cultivés.

FORESTIER (1964), s'inspirant des travaux allemands, fit remarquer que la limite de réponse aux engrais magnésiens du caféier canephora variété Robusta poussant dans les sols ferrallitiques de la République Centrafricaine varie sensiblement en fonction de la teneur en éléments fins (0-20 microns) de l'horizon supérieur de ces sols (tableau XII.14).

TABLEAU XII.14. — *Seuil de déficience en magnésium échangeable pour le caféier et teneurs en éléments fins de l'horizon superficiel d'après FORESTIER (1964)*

Argile + Limon (0-20 microns)	Seuil de déficience en Mg échangeable
Vers 17 %	0,20 mé/100 g
Entre 20 et 30 %	0,25 mé/100 g
Supérieur à 30 %	0,30 mé/100 g

Sans vouloir appliquer brutalement ces chiffres à d'autres plantes cultivées, l'agronome devra se montrer plus exigeant s'il a affaire à des sols argileux que pour des sols sablo-argileux ou sableux.

6.3. TENEURS-LIMITE ET TENEURS OPTIMALES EN CALCIUM

Faiblesse des besoins élémentaires en calcium et absence d'un seuil bien défini

Il est bien connu que les végétaux se contentent de fort peu de calcium pour leur alimentation minérale. Ayant fait pousser au Zaïre de jeunes palmiers sur sable parcouru par une solution nutritive dépourvue de calcium, BROESHART (1956) confirme que les plantules se développèrent normalement, mais que, lors de la récolte, à l'âge de 31 mois, on ne trouva pas les accumulations de calcium habituelles chez leurs homologues de pleine terre. Plante acidophile également, l'hévéa paraît se contenter en Malaisie de teneurs extrêmement basses en calcium échangeable : 0,04 à 0,05 mé/100 g (COULTER, 1972). Quant à l'ananas, il suffit d'une tonne de dolomie par hectare (donc environ 200 kg/ha de calcium-élément) en sol sableux très désaturé de Côte d'Ivoire, pour assurer la réussite de cette culture, même à partir du moment où le sol ne contient pratiquement plus de calcium échangeable (GODEFROY, TISSEAU et LOSSOIS, 1972).

Lorsqu'il existe des cas de déficits absolus en calcium en sols ferrallitiques, il est pratiquement impossible de fixer, même approximativement, des seuils de carence ou de déficience pour le calcium échangeable du sol. Bien avant que l'on ait atteint ces seuils, s'ils existent, des toxicités manganiques ou aluminiques apparaissent interdisant toute spéculation agricole pour la majorité des plantes cultivées.

Toutefois, les considérations développées au chapitre précédent à propos de l'équilibre calcium-magnésium laissent supposer que le sol doit contenir une quantité de calcium au moins égale, et de préférence supérieure à celle du magnésium, donc une quantité théorique de Ca $\geqslant$ 0,40 mé/100 g, excepté sans doute pour les plantes acidophiles : ananas, hévéa, théier, etc.

On a parfois proposé pour le calcium un niveau critique de 0,50 milliéquivalent, en particulier pour le palmier à huile et le cocotier. MANCIOT, OLLAGNIER et OCHS (1979) écrivent à ce propos : « Pour le calcium, le niveau critique retenu de 0,50 n'a jamais été déterminé par l'expérimentation ; il correspond plutôt à un niveau d'équilibre observé lorsque les autres cations sont proches de leur niveau optimal... » Et ils citent un certain

nombre d'expériences montrant que des teneurs du sol en calcium inférieures à ce chiffre n'ont guère eu de répercussions sur les rendements du cocotier (il apparaît toutefois prudent de ne pas aller au-dessous de 0,30 mé/100 g). Ces commentaires rejoignent tout à fait les considérations développées ci-dessus.

Importance du taux de saturation du complexe absorbant

Dans un sol normalement pourvu en bases, le calcium forme entre 60 et 90 % des éléments échangeables. Il est donc logique que l'on se soit préoccupé de définir les niveaux de calcium du sol, non pas uniquement pour satisfaire les besoins élémentaires des plantes, mais en fonction de l'environnement cationique et de la saturation du complexe absorbant.

Souvent, une désaturation importante ($V < 20$ %) des sols ferrallitiques retentit sur les rendements des récoltes par un certain déficit du sol en calcium, bien que les besoins des cultures soient théoriquement assurés (DEMOLON et AUBERT, 1952). Mais il ne s'agit là que d'une moyenne que l'on doit corriger cas par cas : on sait que l'hévéa et le théier, par exemple, se plaisent dans les sols acides, donc fortement désaturés ; par contre, une saturation en bases inférieure à 30 à 40 % des sols ferrallitiques (à kaolinite dominante) est un facteur possible de troubles dans la nutrition du cacaoyer (SMYTH, 1966).

A propos de cette dernière plante, MORAIS, SANTANA et SILVA (1977) reconnaissent que le principal effet du chaulage est d'éliminer l'aluminium échangeable, lorsqu'il existe, dans les sols de la région cacaoyère du sud de l'Etat de Bahia (Brésil), beaucoup plus que de satisfaire les besoins alimentaires de la culture à la vérité assez faibles.

MANDRA (1973) fixe à 2 milliéquivalents pour 100 g de sol la teneur en calcium au-dessous de laquelle un chaulage est nécessaire dans les sols à sisal de Tanzanie (ce qui correspond ici à un pH un peu inférieur à 6) ; il apparaît à l'évidence, vues les teneurs en manganèse de ces sols, qu'il y a alors risque d'une intoxication manganique si le calcium échangeable est par trop inférieur au chiffre cité ci-dessus.

Effectivement, l'état calcique du sol régit directement un certain nombre de caractéristiques, structure, réactions d'échange, pH, toxicités diverses, dont l'influence directe ou indirecte est considérable pour les cultures. Le rôle du magnésium n'est certes pas négligeable à ce point de vue, mais en fait c'est le calcium surtout qui est responsable de ces propriétés.

Valeurs optimales de la teneur du sol en calcium échangeable pour certaines plantes

Bien que la canne à sucre réponde généralement assez mal aux amendements calcaires, FAUCONNIER et BASSEREAU (1970) considèrent qu'il lui faut à peu près 1 mé/100 g de calcium échangeable et que 0,75 mé/100 g est un seuil au-dessous duquel il est dangereux de descendre.

Citant ROCHE, KILIAN (1964) indique que, pour obtenir des rendements de 2 000 kg/ha de coton-graines, il est nécessaire que le cotonnier trouve environ 7 milliéquivalents de calcium échangeable pour 100 grammes de sol dans les terres alluviales de la Bemarivo à Madagascar. DUBERNARD (1975), qui n'a pas affaire à des terroirs aussi riches dans la République Centrafricaine, calcule que la production de cette plante est liée aux teneurs du sol en calcium, magnésium et potassium échangeables par l'équation de régression suivante, où le calcium tient une large place :

$$\text{Rendement coton-graines} = 458 + 368\ \text{Ca} + 144\ \frac{\text{Mg}}{\text{K}}$$

Si l'ananas est indifférent dans les sols de Côte d'Ivoire à une teneur en calcium échangeable inférieure à 1 milliéquivalent pour 100 g, par contre le bananier requiert au moins 3 mé/100 g (GODEFROY, 1974).

Il est bien connu que le cacaoyer préfère les sols neutres bien saturés en bases ; pourtant l'optimum pour le calcium échangeable, 24 mé/100 g, indiqué par HARDY (1966) laisse

un peu rêveur : il est vrai qu'il s'agit des sols jeunes d'Amérique Centrale développés sur roches volcaniques ; même la « limit of adequacy » de cet auteur, 8 mé/100 g de Ca échangeable, est très au-dessus des possibilités de la majorité des sols des pays d'Afrique Occidentale pourtant grands producteurs de cacao.

Il faut ici réserver une place un peu spéciale aux *légumineuses*, celles qui sont le plus intensément cultivées sous les tropiques. D'une façon générale, les légumineuses ont besoin de quatre fois plus de calcium que les autres phanérogames. Mais c'est aussi la seule famille de plantes pour laquelle on a pu évaluer des teneurs du sol en calcium compatibles avec des rendements convenables : ainsi FAUCK (1956) considère que l'arachide a besoin d'au moins 1,5 mé/100 g de calcium dans les sols ferrallitiques sablo-argileux peu désaturés de Casamance (sud du Sénégal), chiffre somme toute assez voisin de celui de MARTIN G. (1964), 2 mé/100 g, dans les sols ferrallitiques très argileux de la vallée du Niari au Congo et de celui de LACHOVER (1966), 1,3 mé/100 g sur des sables d'Israël (ce dernier exemple, qui ne concerne évidemment pas les sols ferrallitiques, est donné ici pour faire remarquer qu'indépendamment des types de sol, on retrouve un échelonnement des valeurs en calcium échangeable en fonction des teneurs du sol en éléments fins).

Les légumineuses de couverture (*Pueraria, Centrosema,* etc.) ont des exigences analogues : elles poussent beaucoup mieux avec des pH de 6 à 7 dans des sols bien pourvus en calcium qu'à pH inférieur à 5 avec 0,1 et 0,6 mé/100 g de Ca échangeable (WATSON, cité par COULTER ; 1972). Elles paraissent cependant plus plastiques que l'arachide et le soja et, pourvu qu'elles aient à leur disposition assez de molybdène et ne soient pas intoxiqués par l'aluminium ou le manganèse, elles supportent assez bien des sols à désaturation avancée. Il est vrai qu'on ne leur demande que de développer leur système végétatif, et non pas de fournir une production déterminée de graines.

Ces quelques exemples n'ont aucunement la prétention de faire le tour de la question, mais d'illustrer le fait que les conditions édaphiques optimales réclamées par certaines plantes ne sont pas toujours en rapport avec leurs besoins élémentaires en calcium toujours assez faibles, les légumineuses se comportant un peu comme des exceptions.

6.4. ECHELLES DE FERTILITE FAISANT INTERVENIR LE CALCIUM ET LE MAGNESIUM

Il ne peut être question ici de répertorier toutes les échelles de fertilité utilisées de par le monde, échelles bien souvent établies sur des terroirs limités et dans un but bien précis ; on se contentera simplement d'en donner quelques exemples significatifs. En outre, les conditions du milieu où travaille constamment un expérimentateur influent notablement sur ses appréciations : c'est ainsi que HARDY (1960), habitué aux très riches sols d'Amérique Centrale, publia une échelle de fertilité pour le cacaoyer que ses collègues du Ghana et surtout du Nigéria et de Côte d'Ivoire eussent certainement abaissée de quelques milliéquivalents s'ils l'avaient réalisée.

On a vu précédemment que si l'on pouvait quantifier assez facilement les teneurs du sol en magnésium échangeable nécessaire aux cultures, cela n'était guère possible pour le calcium, car cet élément, composant essentiel des cations fixés sur le complexe absorbant, régit indirectement un ensemble de propriétés du sol extrêmement importantes. En outre, la disponibilité du calcium et du magnésium échangeables dépend, dans une certaine mesure, de la teneur du sol en éléments fins.

Echelles de fertilité faisant intervenir le magnésium seul

On en citera trois concernant deux zones géographiques aux antipodes l'une de l'autre (tableau XII.15).

Il est somme toute réconfortant de constater une certaine correspondance entre ces échelles, avec cependant une restriction : lorsqu'il s'agit d'hévéa, plante peu exigeante sur le contenu minéral des sols, on a tendance à considérer comme bonne une valeur qui, en d'autres lieux – par exemple dans ces états du Brésil où se pratiquent des cultures riches (caféier, canne à sucre, soja...) sous une forme intensive –, ne serait même pas jugée satisfaisante. C'est d'ailleurs une distorsion que l'on retrouve constamment à propos des échelles de fertilité.

TABLEAU XII.15. – *Echelles de fertilité pour le magnésium échangeable*

Malaisie		Antilles		Brésil	
Echelle de GUHA et YEOW (1966) pour les sols à hévéa citée par De GEUSS (1973)		Echelle de GOLLARDO pour divers sols des Caraïbes et spécialement de Cuba, citée par SISOV et TRESCOV (1971)		Echelle de CATANI et JACINTHO pour les sols du sud et du centre-est du Brésil, citée par MALAVOLTA (1976)	
Mg échang. mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Mg échang. mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Mg échang. mé/100 g	Appréciation de la fertilité
0,15	Basse (low)	0,10	Basse	0,40	Basse
0,15 à 0,30	Moyenne (medium)	0,20 0,40	Moyenne Bonne	0,40-0,80	Moyenne
0,30	Bonne (high)	1,00	Très bonne	0,80	Bonne

Echelles de fertilité où interviennent calcium et magnésium, soit séparément, soit inclus dans la somme des bases échangeables

Le tableau XII.16. réservé au bananier montre bien les différences de conception d'auteurs ayant travaillé dans des terroirs bien différents : Côte d'Ivoire où les sols pauvrement pourvus en bases dominent et Equateur où les cendres volcaniques apportent une fertilité inhabituelle en Afrique de l'Ouest.

Malgré tout, le degré de concordance est bon, compte tenu du fait que les variétés mises en culture ne sont pas les mêmes.

TABLEAU XII.16. – *Deux échelles de fertilité pour le bananier*

Côte d'Ivoire		Equateur		
Sols ferrallitiques et hydromorphes d'après DABIN et LENEUF (1960)		Latosols, regosols, sols alluvieux d'après HERRERA-VASCONEZ (1972)		
Somme des bases échangeables mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Calcium mé/100 g	Magnésium mé/100 g	Appréciation de la fertilité
– de 1,5	Basse	0-32	0-0,08	Basse
1,5 à 3	Médiocre			
3 à 6	Moyenne	3,3-6,4	0,9-1,6	Moyenne
6 à 12*	Bonne	+ de 6,5	+ de 1,7	Bonne à très bonne
+ de 12*	Excellente			

* Il s'agit souvent de sols ayant reçu des amendements calco-magnésiens.

On pourrait faire des remarques analogues à propos du tableau XII.17. ; ici la variété cultivée est la même, *Coffea canephora*, var. *robusta*, mais l'agronome du Congo, habitué

aux sols très pauvres de ce pays, a tendance à un peu surestimer le potentiel de ses sols par rapport à l'évaluation de son collègue de Centrafrique accoutumé à des sols plus riches.

TABLEAU XII.17. — *Echelles de fertilité pour le caféier Robusta*

Congo Sols ferrallitiques d'après BRUGIERE (1956)		République Centrafricaine Sols ferrallitiques d'après BUSCH (1958)	
Somme des bases échang. mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Somme des bases échang. mé/100 g	Appréciation de la fertilité
— de 0,75	Très basse	— de 2	Basse
0,75 à 1,50	Basse		(caféiers déconseillés)
1,50 à 2,50	Médiocre	2 à 5	Moyenne
2,50 à 3,50	Moyenne	5 à 10	Bonne
3,50 à 6	Bonne		
+ de 6	Très bonne	+ de 10	Très bonne

TABLEAU XII.18. — *Echelle de fertilité pour cultures diverses au Brésil*

Etat du Paraná d'après OLMOS et *al.* (1971)	Etat de São Paulo d'après MALAVOLTA (1967)		Nord-Est du Brésil d'après RODRIGUEZ-SILVA, JACOMINE et ALMEIDA (1973)		
Ca + Mg mé/100 g	Ca + Mg mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Somme des bases échangeables	Autres données	Appréciation de la fertilité
— de 2,00	— de 3,0	Basse	— de 0,8	$\frac{Al \times 100}{Al + SBE} > 60$	Basse
2,00-600	3,0-5,0	Moyenne	0,8-3	$\frac{Al \times 100}{Al + SBE} > 60$	Médiocre
				V entre 30 et 60 %	
+ de 6,00	+ de 5,0	Bonne	3,8	$\frac{Al \times 100}{Al + SBE} < 30$	Moyenne
			+ de 8	V > 80 %	Bonne

Outre quelques divergences d'opinion pour les sols souvent semblables des deux états voisins du Paraná et du São Paulo, l'intérêt du tableau XIII.18. réside surtout dans le fait que certains des auteurs mentionnés (RODRIGUEZ-SILVA et *al.*, 1973) ont fait entrer dans l'évaluation de la fertilité des facteurs du type aluminium échangeable et saturation du complexe absorbant trop souvent oubliés lorsqu'il s'agit d'apprécier les potentialités agricoles d'un sol.

Echelles de fertilité faisant intervenir la somme des bases échangeables et la teneur du sol en éléments fins (0-20 microns)

Plus un sol est pauvre en éléments fins (dimensions inférieures à 20 microns, soit argile et limon « granulométriques »), plus ses bases échangeables passent facilement dans la solution du sol et sont donc disponibles pour l'alimentation des plantes.

D'où l'énoncé pour la première fois, semble-t-il, en régions tropicales par FORESTIER (1960) d'un rapport entre bases échangeables et éléments fins, la valeur chiffrée des premières étant mise au carré ; ce rapport lui permet d'établir une échelle de fertilité pour les sols des caféiers de la République Centrafricaine. LATHAM (1971) a effectué un travail similaire pour les sols à cotonnier de Côte d'Ivoire (tableau XII.19.).

TABLEAU XII.19. — *Echelles de fertilité utilisant le rapport* $\frac{(SBE)^2}{Argile\ \% + Limon\ \%}$

République Centrafricaine		Côte d'Ivoire	
Sols à caféier Robusta - Sols ferrallitiques, d'après FORESTIER (1960)		Sols à cotonnier - Sols ferrallitiques, d'après LATHAM (1971)	
$\frac{(SBE)^2}{Argile\ \% + Limon\ \%}$	Appréciation de la fertilité	$\frac{(SBE)^2}{Argile\ \% + Limon\ \%}$	Appréciation de la fertilité
0,2	Très basse		
0,4	Basse	— de 0,3	Basse
0,6 à 0,8	Médiocre	0,3 à 1	Moyenne
1,1	Moyenne	+ de 1	Bonne
1,4 à 1,8	Moyenne à bonne		
1,9 à 3,5	Bonne		
4,1 à 8,8	Très bonne		

NB : Les bases échangeables sont exprimées en mé/100 g et l'argile et le limon par leurs pourcentages respectifs lors de l'analyse granulométrique des sols.

DABIN (1970) a cherché à élargir cette notion de fertilité, restreinte ici à 2 facteurs, pour englober en outre une estimation de la nutrition azotée potentielle par la considération du pH et de la teneur en azote total ; d'où le graphique à 3 entrées (figure 22) qui permet de rassembler quatre éléments essentiels de la fertilité d'un sol (somme des bases échangeables, teneur en éléments fins, azote total, pH).

Echelle de fertilité prenant en compte la saturation en bases des horizons A et B

Dans son évaluation de la fertilité de l'ensemble des sols des tropiques humides (dont évidemment font partie les sols ferrallitiques), SYS (1978) utilise le degré de saturation en bases des horizons A et B, afin de tenir compte du fait que les sols situés sous les climats les plus humides ont normalement un horizon B assez fortement désaturé — même si A possède encore une bonne saturation en bases — ; dans ce but, il s'appuie sur la « Soil Taxonomy » pour différencier les régimes hydriques en « udique » et « ustique » suivant que la saison sèche dure moins de 90 jours ou plus de 90 jours (tableau XII.20.).

Rappelons que, pour SYS (op. cit.), une limitation « légère » représente une possibilité de récolte de 85 à 98 % du rendement maximal, « moyenne » de 60 à 85 %, « forte » de 45 à 60 % et « très forte » de moins de 45 %. Ces qualificatifs ont donc ici une signification beaucoup plus précise que pour la plupart des auteurs cités.

FIGURE 22
Appréciation de la fertilité des sols ferrallitiques moyennement désaturés de Côte d'Ivoire par la relation entre azote total, pH et rapport $\frac{(SBE)^2}{A+L}$
d'après DABIN *(1970c)*

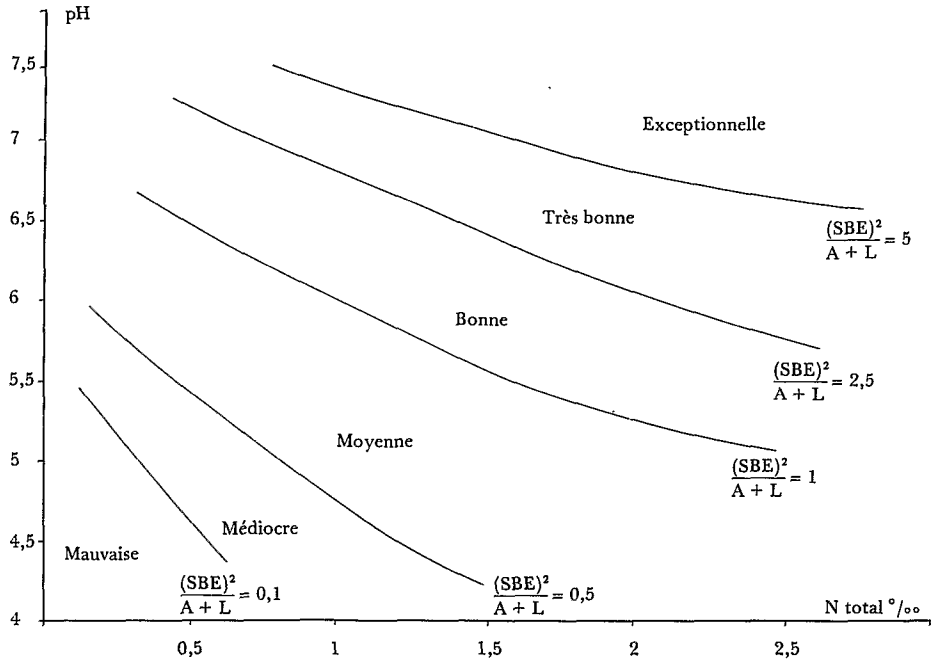


TABLEAU XII.20. — *Limitations agricoles en fonction du degré de saturation en bases des horizons A et B d'après* SYS *(1978)*

Régimes hydriques et groupes de culture \ Saturation en bases %	Limitations agricoles				
	Nulle	Légère	Moyenne	Forte	Très forte
Ustique					
Plantes exigeantes et moyennement exigeantes	B > 50 % avec A > 50 %	B > 50 % avec 50 % < A < 80 %	B < 50 % avec 35 % < A < 50 %	B < 50 % avec A < 35 %	
Plantes peu exigeantes	A > 50 % quel que soit B	B < 50 % avec 35 % < A < 50 %	B < 50 % avec A < 35 %		
Udique					
Plantes exigeantes	B > 50 % avec A > 50 % et B < 50 % avec A > 50 %	35 % < A < 50 % (B quelconque)	20 % < A < 35 % (B quelconque)	A < 20 % (B quelconque)	
Plantes moyennement exigeantes	A > 35 %	20 % < A < 35 %	A < 20 %		
Plantes peu exigeantes	A > 35 %	20 % < A < 35 % et A < 20 %			

6.5. DISCUSSION

Si l'on considère uniquement les besoins élémentaires des plantes, ceux-ci peuvent être couverts par des teneurs du sol très faibles en calcium et magnésium échangeables ; pour le calcium, elles sont très nettement inférieures à 1 mé/100 g (cas extrême, 0,04 mé/100 g paraît suffire à l'hévéa, selon COULTER, 1972) ; quant au magnésium, 0,10-0,17 mé/100 g situe à peu près le seuil de carence et 0,25-0,35 mé/100 g le seuil de déficience.

Mais ces conditions ne conviennent guère qu'aux plantes à caractère acidophile accusé, hévéa, théier, ananas... Et on a vu qu'en certaines occasions, le théier pouvait être incommodé par la présence simultanée d'aluminium échangeable et de manganèse assimilable en quantité excessive. Or, la grande majorité des plantes cultivées est très sensible aux caractéristiques du sol induites par une bonne saturation en bases, calcium en particulier.

Des exemples cités plus haut, il semble résulter qu'il faut au minimum 2 à 3 milliéquivalents de bases, essentiellement du calcium, dans une moindre mesure du magnésium et aussi du potassium, pour assurer des rendements agricoles corrects.

Il s'agit là d'une valeur absolue, qui ne tient pas compte de la valeur du complexe absorbant et donc de la saturation en bases ; on sait qu'un taux de saturation inférieur à 40 % est préjudiciable au cacaoyer, mais cette donnée est rarement prise en compte pour les autres cultures.

Ce sera l'un des objectifs des parties suivantes de relier pH et saturation en bases.

7. ALUMINIUM ECHANGEABLE

7.1. GENERALITES

Lorsque l'on parle de l'importance pour l'agriculture de l'aluminium que peuvent contenir les sols, c'est toujours à l'aluminium ionique Al^{+++}, dénommé échangeable (1) par la terminologie anglo-saxonne, que l'on se réfère. L'évaluation de l'aluminium échangeable se révèle indispensable — au moins dans les sols acides —, car cet élément a la redoutable propriété de provoquer des toxicités telles qu'elles peuvent, à la limite, provoquer la mort des plantes cultivées et, de ce fait, réduisent très fortement les possibilités de succès de certaines cultures (BOYER, 1976).

7.2. TOXICITE ALUMINIQUE ET VALEURS ABSOLUES DE L'ALUMINIUM ECHANGEABLE

On a cherché à relier les symptômes de toxicité aluminique aux valeurs de l'aluminium échangeable. Les observations de divers auteurs sont réunies sur le tableau XII.21.

(1) Etant donné les propriétés de fixation de ce type d'aluminium sur les sites d'échange du complexe absorbant et l'élimination hors du complexe absorbant par échange avec d'autres cations (calcium en particulier), l'appellation « aluminium échangeable » paraît de beaucoup préférable à celles d'« aluminium actif », « aluminium mobile », etc. que l'on trouve parfois dans la littérature agronomique francophone.

Ces valeurs absolues ont l'inconvénient de ne pas tenir compte du milieu sol, même si l'on envisage seulement celui ou ceux qui caractérisent les sols ferrallitiques.

Un exemple aidera le lecteur à préciser cette notion. C'est ainsi que ADAMS et LUND (cités par REEVE et SUMMER, 1970) ont constaté dans trois catégories de sols des Etats-Unis bien différents entre eux des seuils critiques d'aluminium échangeable pour le cotonnier, respectivement aux niveaux de 0,1, 1,0 et 2,4 milliéquivalents pour 100 g de sol. Lorsqu'on borne ses observations au domaine ferrallitique, l'intervalle ci-dessus est plus restreint mais reste fort sensible parfois, étant donné la vaste gamme de sols que recouvre cette appellation.

TABLEAU XII.21. — *Toxicité aluminique en fonction des valeurs absolues du sol en aluminium échangeable*

Plante	Toxicité de l'aluminium échangeable	Type de sol	Auteur et lieu de l'étude
Ananas	Seuil de toxicité 50 ppm (0,54 mé/100 g)	Sol ferrallitique modal fortement désaturé	GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL (1976) Côte d'Ivoire
Arachide	Seuil de toxicité 50 à 60 ppm (0,55 à 0,66 mé/100 g)	Sol ferrallitique fortement désaturé	VELLY (1974) Madagascar
Canne à sucre	180 ppm (2 mé/100 g) 100 t/ha de canne à sucre 720 ppm (8 mé/100 g) 25 t/ha de canne à sucre	humic tropic ultisol humic tropic ultisol	ABRUNA-RODRIGUEZ et VINCENTE-CHANDLER Puerto Rico « idem »
Cotonnier	Seuil de toxicité 25 ppm (0,27 mé/100 g)	Sol ferrallitique fortement désaturé	VELLY (1974) Madagascar
Maïs	120-130 ppm (1 mé/100 g) Seuil de toxicité	Sol ferrallitique fortement désaturé	VELLY (1974) Madagascar
Soja	Seuil de toxicité 8 ppm (0,09 mé/100 g)	Red Yellow podzolic soil	Cité par SEMENT (1980) Etats-Unis
Tabac	Quelques ppm croissance fortement ralentie	Oxisol-ultisol	ABRUNA-RODRIGUEZ et *al.* (1970) Puerto Rico
Théier	Supporte parfaitement 265 ppm (3 mé/100 g) et plus	Ferrallitique fortement désaturé	CHENERY (1955) Ouganda

Dans le même esprit, on s'est préoccupé, au Brésil, de définir des échelles pour les teneurs en aluminium échangeable : ainsi qu'on peut le voir sur le tableau XII.22., elles ne sont pas identiques même pour des zones géographiques relativement proches.

Elles sont cependant fort utiles pour effectuer un « tri » dans les sols afin de déterminer ceux qui sont aptes à porter des cultures plus ou moins sensibles à l'aluminium échangeable et ceux qu'il vaudra mieux abandonner à l'élevage extensif.

TABLEAU XII.22. — *Limitations agricoles et aluminium échangeable en milliéquivalents pour 100 grammes de sol, d'après deux échelles brésiliennes*

Limitations agricoles	Echelle de MUZILI et KALCKMANN cité par OLMOS et *al.* (1971) Etat du Paraná, Brésil	Echelle dite de Foz de Areia. CERENA (1974) Etat du Paraná, Brésil
Très forte		> 3,0
Forte à moyenne	> 2,0	1,6 à 3,0
Moyenne à faible	2,0 à 0,75	0,6 à 1,5
Faible à nulle	< 0,75	⩽ 0,50

7.3. TOXICITE ALUMINIQUE ET COMPLEXE ABSORBANT. SEUILS DE TOXICITE

Saturation du complexe absorbant par l'aluminium échangeable

On a essayé de définir des seuils d'aluminium échangeable par rapport au degré de saturation de la capacité d'échange T par ce cation. Une première approche en fut donnée par MOHR (1960) au moyen de la relation :

$$M = \frac{Al}{T} \times 100$$

D'où les valeurs-limite répertoriées sur le tableau XII.23.

TABLEAU XII.23. — *Seuils de toxicité pour l'aluminium échangeable en fonction de la relation de MOHR (1960)*

Culture	Seuil de toxicité pour $M = \frac{Al^{+++}}{T} \times 100$	Auteur et lieu de l'étude
Luzerne, orge de brasserie, blés américains (du Nord)	M = 15	MOHR (1960) Sud du Brésil
Avoine, seigle, escourgeon, blés brésiliens	M = 30	MOHR (1960) Latossolos. S. podzolizados Sud du Brésil
Maïs	M = 35	MOHR (1960) Sud du Brésil (Latossolos)
Maïs	M = 33	Ultisols-Nigéria (1)
Maïs	M = 5-10	Ultisols-Puerto-Rico (1)
Maïs	M = 10-20	Oxisol-Puerto Rico (1)
Cotonnier	M = 20	KAMPRATH (1970)
Soja	M = 20	Ultisols (Sud-Est E.U.A.)
Haricots	M = 20	MOHR (1960) Latossolos. Brésil

(1) Cités par SEMENT (1980).

Comparaison de la saturation du complexe absorbant par les bases échangeables et l'aluminium échangeable

La relation de KAMPRATH (1967) :

$$m = \frac{Al}{Al + SBE} \times 100$$

est en pratique assez voisine de celle de MOHR, l'aluminium échangeable ayant tendance, aux bas pH auxquels cet élément apparaît et se développe, à remplacer progressivement les ions H^+ présents sur le complexe d'échange au fur et à mesure que le pH s'abaisse. Néanmoins, de légères différences subsistent, ainsi que l'on pourra s'en rendre compte sur le tableau XII.24.

TABLEAU XII.24. — *Seuils de toxicité aluminique en fonction de la relation de KRAMPRATH (1967)*

Culture	Seuil de toxicité pour Al^{+++}	Auteur, type de sol et lieu de l'étude
Cotonnier	m = 10	KRAMPRATH (1970)
Soja	m = 20	Ultisols. Sud-Est des Etats-Unis
Maïs	m = 45	
Soja (cultivar sensible)	m = 10	MUZILLI et *al.* (1978)
Soja (cultivar résistant)	m = 21-25	« Latossolo Roxo distrófico álico » Etat du Paraná. Brésil
Blé (cultivar sensible)	m = 20	« idem »
Blé (cultivar résistant)	m = 45	

La relation de KAMPRATH (op. cit.) est systématiquement utilisée au Brésil, lors de la cartographie des sols, afin d'apprécier les risques de toxicité aluminique ; les cartes de mise en valeur de ce pays fixent un peu arbitrairement à m = 50 une limite supérieure pour la majorité des plantes cultivées (sauf bien entendu pour quelques plantes très résistantes, hévéa, théier, mélinis...) et à m = 10 un seuil au-dessous duquel il n'y a pratiquement plus de baisses de rendement ou d'accidents végétatifs graves (OLMOS et CAMARGO, 1976), bien que certains auteurs dans ce pays préfèrent voir employer respectivement m = 45 et m = 5 (MUZILLI et KALCKMANN, 1971) ou souhaitent introduire un échelon intermédiaire à m = 30 (RODRIGUEZ-SILVA et *al.*, 1973).

Les valeurs-seuils ainsi définies (m = 50 et m = 10) sont valables normalement pour toute la zone de pénétration des racines. Toutefois, OLMOS et CAMARGO (op. cit). les utilisent surtout pour caractériser le sous-sol (et la barrière chimique qui s'y trouve), considérant à tort ou à raison qu'il est toujours possible d'éliminer par un chaulage l'aluminium qui se trouve en surface (et qui est aussi moins actif du fait de la présence de matière organique).

Le tableau XII.25. essaie de synthétiser sous forme de limitations culturales ces divers renseignements.

TABLEAU XII.25. — *Limitations culturales et aluminium échangeable du sol exprimés par la relation* $m = \frac{Al}{Al + SBE} \times 100$

Limitations culturales	Valeur de la relation m	Types de cultures possibles et observations
Nulle	$m < 5$	Toutes cultures, y compris les plus sensibles (tabac, haricots, soja, cotonnier, cacaoyer)
Faible	$5 < m < 10$	Toutes cultures, mais baisses de rendements probables pour tabac, cacaoyer, soja, haricots (sauf variétés résistantes)
Moyenne	$10 < m < 30$	Caféier, canne à sucre, blé, arachide, igname, palmier à huile, poivrier, citrus
Forte	$30 < m < 45$	Canne à sucre, palmier à huile, poivrier (avec baisse de rendement), maïs, riz, manioc, passiflore, etc.
Très forte	$m > 45$	Hévéa, théier, ananas, graminées résistantes (mélinis), herbe à Maté

NB Lorsque les cultures sont indiquées pour une catégorie de sols (par exemple à limitation moyenne), elles sont encore possibles dans la catégories suivante (ici avec limitation forte), mais réagissent alors par des baisses de rendements plus ou moins sensibles ; elles sont évidemment encore mieux à leur place dans les catégories précédentes (ici avec limitations faible et nulle).

7.4. DISCUSSION

Dans les différentes échelles citées ici et concernant l'aluminium échangeable, on s'est efforcé de tenir compte du milieu sol et de ses caractéristiques.

Il est cependant probable que, même si on utilise la relation de KAMPRATH (op. cit.), on ne fait pas assez intervenir la quantité de bases échangeables présentes dans le sol. En effet, le rapport m est habituellement établi pour des sols fortement désaturés en bases où la somme des cations échangeables dépasse exceptionnellement 1 milliéquivalent pour 100 g de sol. Dans des sols relativement bien fournis en éléments alcalino-terreux, il faut compter aussi avec l'antagonisme Ca-Al qui réduit quelque peu la toxicité aluminique, même s'il existe des quantités importantes d'aluminium échangeable qui devraient engendrer des toxicités si on les compare avec les teneurs absolues répertoriées aux tableaux XII.21. et XII.22. ; c'est ainsi que dans les ultisols de Puerto Rico, la canne à sucre produit encore 25 tonnes par hectare de cannes « usinables » avec 8 milliéquivalents d'aluminium, mais aussi 2 milliéquivalents de bases échangeables pour 100 g de sol (on notera qu'ici m = 80, ce qui normalement devrait interdire cette culture) ; c'est malgré tout un tonnage très faible comparé aux 100 tonnes par hectare obtenues lorsque la somme des bases échangeables atteint 8 mé/100 g de sol et l'aluminium échangeable 2 mé/100 g, soit une valeur m de l'ordre de 20 (ABRUNA-RODRIGUEZ et VICENTE-CHANDLER, 1967).

L'aluminium échangeable étant la conséquence directe, et l'une des plus tangibles, d'un pH par trop acide, il est tentant de l'éliminer grâce à un chaulage. Point n'est besoin d'atteindre pH 6,5 comme le préconisent REEVE et SUMMER (1970) pour les oxisols du Natal (1), en général des pH allant de 5,2 à 5,5 suffisent. A partir de ces valeurs, l'aluminium

(1) A vrai dire, cette forte élévation du pH est destinée, outre l'élimination de Al^{+++}, à rendre plus assimilable le phosphore fortement fixé dans ces sols.

échangeable n'existe plus ou existe en quantité si faible que sa présence n'a plus aucun inconvénient.

Evidemment, pour épandre des amendements calciques, il faut, vu l'important tonnage à transporter, disposer d'une infrastructure adéquate (route-chemin de fer-rivière) pour pouvoir se rendre économiquement jusqu'à un gisement qui ne soit pas trop éloigné. Dès que les distances s'allongent, les coûts deviennent prohibitifs. C'est ce qui se passe pour l'ensemble du bassin amazonien, une grande partie de l'Afrique Occidentale et Centrale, etc.

Aussi a-t-on préconisé la sélection de variétés résistantes à l'aluminium échangeable. Outre que, sauf exceptions, la présence d'aluminium est synonime de complexe absorbant fortement désaturé en Ca, Mg et K, ce qui est le contraire d'un facteur favorable à l'obtention de rendements élevés, l'histoire contemporaine enseigne qu'il faut être prudent en ce domaine. En effet, on a sélectionné pour le sud du Brésil, principalement les Etats du Rio Grande do sul, Paraná et Santa Catarina, des variétés de blé qui, effectivement, se sont révélées résistantes à l'aluminium échangeable dont sont abondamment pourvus les sols. Malheureusement, le généticien ne peut pas toujours faire des miracles : le choix du caractère « résistance à Al » s'est accompagné d'une grande sensibilité à la verse et au piétain (d'autant plus génante que la maturité du blé coïncide avec les premières pluies de mousson) et surtout d'une productivité si faible, 5 à 12 quintaux par hectare suivant les années, qu'elle apparaît désastreuse à côté des 50 à 80 quintaux/hectare obtenus communément en Europe Occidentale.

Ceci ne veut pas dire qu'il faille abandonner toute tentative des sélection en ce sens, bien au contraire ! Mais il est très probable qu'il faudra se contenter d'une résistance modérée à l'aluminium échangeable, que l'on combinera avec des chaulages « modérés » pour un prix de revient de ces chaulages lui aussi « modéré ».

8. OLIGO-ÉLÉMENTS

8.1. CUIVRE

Comme pour un certain nombre d'oligo-éléments, le cuivre n'a qu'assez tardivement intéressé les agronomes, non pas parce que cet élément est moins important que les autres, mais parce que les symptômes qui caractérisent les carences qu'il provoque se confondent assez facilement avec les chloroses ferriques et aussi parce que les toxicités qui lui sont imputables sont assez rares. On peut ajouter que le cuivre est fixé avec une telle force dans le sol que les solutions habituellement utilisées pour extraire les bases échangeables sont incapables de le déplacer, et que celles employées pour les oligo-éléments assimilables n'en extraient que des quantités infimes, d'où une difficulté supplémentaire à caractériser le cuivre des sols. Contrairement à beaucoup d'autres oligo-éléments, le cuivre présente une marge importante entre seuil de carence et seuil de toxicité. BOLLES-JONES (1957-a) a établi l'échelle suivante pour Hévéa brasiliensis poussant en solution nutritive :

0,001 ppm de Cu	carence sévère
0,008 ppm de Cu	carence très atténuée (déficience)
0,064 ppm de Cu	croissance normale de l'hévéa
0,512 ppm de Cu	niveau qu'on avait cru trop élevé, mais qui finalement n'a produit aucune toxicité.

Rien ne prouve que ces chiffres soient applicables tels quels aux sols et que toutes les plantes soient aussi peu sensibles que l'hévéa, mais l'échelonnement demeure.

Toxicités

Pratiquement, les toxicités dues à une accumulation naturelle de cuivre dans les sols sont relativement exceptionnelles ; elles se localisent à peu près uniquement aux sols issus de roches surmontant des gisements cuprifères. DUVIGNAUD et DENAEYERT DESMET (cités par JUSTE, 1970) en donnent un exemple dans le haut Katanga. Et, si l'on en juge par les difficultés de la prospection géochimique du cuivre au Brésil, ce cas est loin d'être général.

Par contre, les traitements anticryptogamiques à base de bouillies cupriques peuvent à la longue favoriser des concentrations de cuivre d'autant plus intenses que, comme beaucoup de métaux lourds, le cuivre est très fortement retenu par le complexe absorbant et de ce fait est fort peu sensible à la lixiviation. Le problème est pris très au sérieux en France où les sols de vignobles et vergers traités depuis plus de 100 ans peuvent montrer des teneurs anormalement élevées en cuivre, nocives pour beaucoup de plantes (DROUINEAU et MAZOYER, 1962) (1).

On est encore loin d'une telle situation dans toute la zone des sols ferrallitiques. Mais il va sans dire que les fongicides pulvérisés parfois régulièrement sur bananiers, citrus, caféier, etc. pourraient conduire à des mésaventures de ce genre, et certainement plus rapidement qu'en sols tempérés. THROWER (1960) avait bien constaté que des pulvérisations un peu trop généreuses de sulfate de cuivre sur des cacaoyers de Nouvelle Guinée avaient eu un effet dépressif qu'il attribue au cuivre ; apparemment, il s'agit là d'un empoisonnement de l'arbre par simple absorption à partir des feuilles. Mais on se préoccupe de l'effet sur les sols en milieu tropical, comme en témoigne le travail d'ANDRADE (1973) sur Coffea arabica dans les « latossolos » et « regossolos » du Brésil. Cet auteur propose d'ailleurs les remèdes classiques : apport de matière organique pour complexer le cuivre et relèvement du pH à 6,3 par chaulage pour diminuer son assimilabilité.

C'est le cuivre assimilable — ou échangeable, ou extractible, suivant les appellations de divers auteurs — qui se révèle le responsable de ces toxicités, les chiffres de cuivre total n'ayant à ce point de vue aucune signification pratique. Malheureusement, le cuivre des traitements anticryptogamiques reste en grande partie dans l'horizon supérieur du sol sous une forme très facilement diffusible dans la solution du sol : DROUINEAU et MAZOYER (1962) ont calculé qu'un tiers du cuivre appliqué depuis 70 ans dans le vignoble bordelais restait assimilable dans l'immédiat par les plantes.

Carences et déficiences

Les déficiences et carences en cuivre se manifestent surtout en sols sableux faiblement fournis en éléments nutritifs divers (le cuivre ne fait généralement pas exception s'il y a pauvreté générale), en sols ayant subi des chaulages massifs et en sols très riches en matières organiques, sols de tourbe le plus souvent (MOITY, 1961 sur bananier en Côte d'Ivoire ; NG SIEW KEE, TAN et CHEONG, 1974, sur hévéa en Malaisie, etc.).

Comme on apporte bien souvent le cuivre par pulvérisations sur le feuillage, la littérature agronomique foisonne de prétendus cas de déficience en cuivre guéris par ce procédé ; en fait, les suppléments de rendements proviennent la plupart du temps de l'élimination des champignons parasites. Pourtant, quelques auteurs pensent que l'augmentation de la récolte de cacao ou de café est supérieure parfois à ce qu'aurait donné la simple éradication des maladies cryptogamiques (c'est le « tonic effect » de RAYNER, 1951 ; TOLLEMAR, 1959 ; BOWDEN, 1961). Il s'agit donc dans ces cas précis (Kenya, Trinidad, Ghana) d'une légère déficience. Il n'en reste pas moins qu'il existe un certain nombre de cas de carences en cuivre, bien caractérisées par des symptômes folliaires :

---

(1) La protection sanitaire du vignoble nécessite annuellement entre 15 et 20 kg de cuivre-métal à l'hectare (JUSTE, 1970), d'où l'importance des apports cumulés sur 100 ans. Malgré certains substituts, le cuivre reste, même encore maintenant, la base de la lutte contre le mildiou.

— sur blé dans les Highlands du Kenya, sur des sols qui ne sont probablement pas tous ferrallitiques (PINKERTON, BARRET et GUTRIE, 1959),

— sur caféier au Kenya (CHENERY, 1954),

— sur ananas en Guinée (TISSEAU, 1959),

— sur palmier à huile en Malaisie (NG SIEW KEE et *al.*, op. cit.) etc.

Il apparaît toutefois bien établi que la majeure partie des accidents de carence en cuivre se produit en sols tourbeux et non pas en sols ferrallitiques.

Teneurs critiques

Seuil de toxicité

Ainsi que souligné précédemment, les risques d'intoxication pour une plante donnée dépendent de la quantité de cuivre échangeable présent dans le sol (ici cuivre extractible à l'acétate d'ammonium neutre et normal) et du pH, ces deux données étant absolument indispensables au diagnostic de la toxicité (JUSTE, 1970).

En ce qui concerne les sols du sud de la France, DROUINEAU et MAZOYER (1962) ont établi un certain nombre de repères pour le maïs, en fonction du pH et des teneurs en cuivre échangeable du sol :

pH 6	Cu éch. 50 ppm	la toxicité commence à se manifester en retardant légèrement la croissance,
pH 6	Cu éch. 100 ppm	croissance diminuée de moitié,
pH 6	Cu éch. 200 ppm	croissance très fortement ralentie,
pH 5	Cu éch. 50 ppm	croissance nettement diminuée,
pH 5	Cu éch. 100 ppm	inhibition très forte de la croissance, supérieure à ce qui se passe à pH 6 pour 200 ppm de Cu.

Bien que l'on possède relativement peu de données relatives aux sols ferrallitiques, il semble que ces résultats puissent y être transposés, avec prudence s'entend, étant donné les différences de comportement des sols et les sensibilités particulières des plantes. C'est ainsi qu'ANDRADE (1973) constate que pour le caféier arabica, avec un pH du sol de l'ordre de 5,5, 200 ppm de cuivre assimilable engendrent une toxicité notable, alors que si on relève le pH à 6,3, ces mêmes 200 ppm de cuivre ne présentent aucun inconvénient ; cette expérience concerne des « regosolos » (sols sableux peu évolués) et des « latossolos » (sols ferrallitiques modaux souvent argileux) du Brésil, sans qu'apparemment il y ait de différences notables entre types de sol dans l'apparition des symptômes de toxicité, contrairement à ce que l'on admet en pays tempérés où, à teneurs égales de cuivre, les toxicités sont réputées plus sévères en sols sableux qu'en sols argileux.

Seuil de carence

Lorsque l'on examine les cas de carences en cuivre répertoriés par la littérature agronomique, il est très symptomatique de constater qu'une fois la carence diagnostiquée (il s'agit le plus souvent d'un blanchiment des parties très jeunes en voie de croissance rapide, comme les bourgeons terminaux), on se contente d'effectuer des pulvérisations de cuivre sur le feuillage, et généralement tout rentre dans l'ordre. Quant aux analyses de cuivre dans les sols, on oublie trop souvent de les faire, peut-être parce qu'il est impossible ou trop délicat de les relier à des normes déjà établies... qui le plus souvent n'existent pas ou sont peu sûres. Tout au moins en milieu ferrallitique.

Les déterminations de cuivre assimilable ou échangeable ou extractible par une méthode donnée sont, en définitive, assez rares, quel que soit le type de sol, sans doute parce que les valeurs obtenues sont très faibles : ainsi dans un sol acide de Côte d'Ivoire cultivé en ananas, on trouve entre 0,1 et 0,6 ppm de cuivre extrait à l'acide acétique à

2,5 % (soit à pH 2,5) (GODEFROY et *al.*, 1976), valeurs qui sont pratiquement à la limite de la précision de l'analyse (à noter qu'il n'y a pas de carence en cuivre sur ces ananas).

Quant au cuivre total, MALAVOLTA (1976) pense qu'au Brésil 4 à 6 ppm conviennent pour les sols minéraux (qui incluent la majorité des ferrallitiques) et 20 à 30 ppm pour les sols organiques.

Faute de références assez nombreuses sur les sols ferrallitiques, il est intéressant de voir ce qui existe ailleurs. Ainsi, l'expérience acquise en France montre que la plupart des réactifs utilisés pour l'extraction du cuivre « assimilable », « utile », « échangeable », etc. n'extraient que des quantités insignifiantes de cuivre, à tel point qu'il est à peu près impossible d'établir un seuil de carence. Par contre, il existe une relation nette entre la teneur en cuivre total (extrait au réactif nitro-perchlorique) d'un sol et l'apparition des symptômes de carence cuprique sur les végétaux ; on a ainsi pu déterminer, dans les sols du massif armoricain, un seuil de carence cuprique qui se situe vers 7 à 8 ppm de cuivre total (DUVAL et MAURICE, 1970). Si l'on en croit les chiffres répertoriés plus haut, ce seuil de carence pourrait se situer à un niveau inférieur en milieu ferrallitique.

Discussion

On a vu que les toxicités dues au cuivre du sol dépendaient tout autant du pH que des teneurs en cuivre (ici cuivre échangeable, le plus souvent).

Pour les carences, il faut également tenir compte de la matière organique du sol. En fait, ce sont les sols les plus organiques, tourbes, sols d'altitude, qui développent les carences les plus aiguës.

Plutôt que de rechercher un niveau absolu de carence en cuivre total, il pourrait sans doute être judicieux de confronter en même temps taux de cuivre et de matière organique à l'apparition des symptômes de carence. Jusqu'à présent, il ne semble pas que l'on ait tenté de rapprocher, en données chiffrées, ces différentes teneurs.

8.2. ZINC

Si l'on met à part les prémonitions géniales de Gabriel BERTRAND, ce sont deux savants français JAVILLIER et MAZE qui, tout juste avant la première guerre mondiale, apportèrent les premiers la preuve de l'utilité du zinc pour les végétaux supérieurs et en particulier pour le maïs (COPPENET, 1970).

Comme pour la plupart des oligo-éléments, les marges entre carence et bonne alimentation en zinc, bonne alimentation et toxicité sont étroites. Ainsi, THORNE (1957) rapporte que, pour les chlorelles poussant en solution nutritive, 0,001 mg de Zn pour 100 ml stimule la croissance (il y a donc déficience au-dessous de cette valeur) et 0,005 mg de Zn pour 100 ml la retarde (donc toxicité).

Carences et toxicités

Jusqu'à présent, on n'a pratiquement pas signalé de toxicité du zinc sur les sols ferrallitiques. Par contre, les carences en zinc apparaissent relativement fréquentes. En voici quelques exemples, parmi bien d'autres :

— sur citrus : en Ouganda (CHENERY, 1954), en Côte d'Ivoire en sols sur sables tertiaires (LOUE, 1961), au Brésil (MALAVOLTA, 1967)...

— sur Aleurites au Malawi en sols sableux (FORSTER, 1962),

— sur cacaoyer en Côte d'Ivoire (LOUE, 1961) en sols sur schistes,
— sur caféier au Brésil — Etat de São Paulo — (MALAVOLTA, 1967),
— sur maïs au Nigéria (HEATHCOTE, 1971),
— sur bananier en Guinée et Côte d'Ivoire (MOITY, 1954),
— sur ananas en Guinée (PY, 1963).

Evidemment, cette énumération est loin d'être exhaustive, mais elle donne une idée de la fréquence de ces accidents, qui, s'ils ne sont tout de même pas courants, représentent une éventualité à prendre en considération dans certaines circonstances, comme on le verra plus loin.

Il est assez rare que des provinces pédologiques entières soient atteintes par des carences en zinc, celles-ci apparaissant le plus souvent comme ponctuelles. Toutefois, le Campo Cerrado brésilien semble affecté par une déficience assez générale en cet élément (GALRÃO, SUHET et SOUSA, 1978). D'autre part, les sols sableux, qui sont bien souvent, à vrai dire, mal pourvus en zinc seront les plus frappés. Enfin on peut noter que THORNE (1967), en répertoriant les sols carencés en zinc des Etats-Unis, en crédite largement la zone subtropicale de ce pays (Floride, Louisiane, Georgie, Caroline), celle des « Red and Yellow podzolic soils ».

Teneurs-limite

Seuils de toxicité

Il existerait un seuil de toxicité au voisinage de 100 ppm de zinc extractible (ou assimilable) selon AUBERT et PINTA (1971) en sols acides seulement, car, au voisinage de la neutralité, le calcium diminue l'assimilabitilité du zinc (bien qu'il reste encore extractible à l'acétate de NH_4 ou aux acides dilués) ; d'où, dans ce cas, une valeur-seuil nettement supérieure aux 100 ppm cités ci-dessus. Ceci ne concerne pas spécialement les sols ferrallitiques, mais ne les exclut pas non plus. En fait, une toxicité du zinc en sols ferrallitiques ne se constate qu'à titre d'exception.

Seuil de carence

De nombreux travaux se sont efforcés de déterminer des seuils de carences en zinc assimilable ou extractible dans les sols.

Une certaine confusion semble régner à ce sujet, certainement favorisée par la multiplicité des processus analytiques utilisés. SHAW et DEAN (1952) placent le seuil de carence en zinc extractible à 0,5 ppm pour des pH inférieurs à 6,5 et TRIERWEILER et LINDSAY (1969) à 1,4 ppm, ceci aux Etats-Unis. En ce qui concerne les sols de France, il serait situé entre 1 et 3 ppm de zinc extrait à HCl dilué (DARTIGUES, 1964).

Les expériences faites en sols ferrallitiques ont conduit GESTIN et ROUX (1974) à adopter au Cameroun le premier chiffre (0,5 ppm à pH < 6,5). Toutefois, pour OSINAME et *al.* (1973), il apparaît qu'une teneur de 1 ppm de Zn extrait à HCl 0,1 N est la limite inférieure admissible pour le maïs au Nigéria.

DABIN et LENEUF (1960), peut-être plus exigeants, admettent que des carences en zinc peuvent se manifester sur les bananiers lorsque le sol contient moins de 8 à 10 ppm de zinc, mais il s'agit là de zinc total.

Discussion

Il semble bien que l'apparition de carences en zinc ne soit pas étroitement liée aux taux de zinc assimilable ou extractible du sol. En fait interviennent également les facteurs qui règlent la dynamique du zinc (pH, teneurs du sol en matière organique et en hydroxydes

de fer colloïdaux). De même, les synergies et antagonismes avec d'autres éléments (P, Mg, K, Cu, As) jouent également un rôle ; de telle sorte que les cas les plus fréquents d'apparition des carences en zinc ont lieu :

— lors des relèvements brutaux de pH par chaulage ; il s'agit là d'une cause souvent observée ;

— à la suite d'une fumure phosphatée trop forte ;

— par antagonisme avec le cuivre et l'arsenic (ici en raison d'un traitement par herbicide en contenant) ;

— par complexation avec une matière organique très abondante.

On peut évidemment corriger les carences en zinc par un apport au sol (quelques kilogrammes d'un sel soluble de zinc par hectare) et c'est même la façon la plus sûre de les éliminer à terme.

Bien souvent, il est préférable, si l'on veut faire un traitement curatif à effet immédiat, d'effectuer des pulvérisations sur le feuillage.

8.3. MANGANESE

Contrairement aux autres oligo-éléments dont la dynamique est principalement sous la dépendance du pH et dans une moindre mesure de la matière organique, la mobilité du manganèse est en plus très dépendante des conditions d'oxydo-réduction. En fait, le manganèse s'avère facilement réductible en formes mobiles facilement assimilables dès que les conditions d'hydratation engendrent une certaine anaérobiose.

Les sols ferrallitiques étant habituellement des sols perméables, « sains » au moins en surface, on pourrait donc supposer qu'il puisse y exister en certains cas des difficultés d'approvisionnement des plantes en manganèse. En fait, il n'en est rien. Bien au contraire ! Ce sont les toxicités qui préoccupent surtout (pour ne pas dire presqu'exclusivement) les agronomes œuvrant en milieu tropical, beaucoup plus que les carences, à vrai dire assez rares.

Carences et seuils de carence

Les carences en manganèse semblent avoir été reconnues pendant les années quarante d'abord aux Etats-Unis, puis en France, chaque fois sur céréales. Apparemment, il s'agissait surtout de déficit absolu du sol en manganèse.

En milieu ferrallitique des cas de cette sorte sont assez rares. On signale bien une déficience sur palmier à huile à Dabou en Côte d'Ivoire (OLLAGNIER, OCHS et MARTIN, 1970), dont la conséquence fut plus une sensibilité accrue à la fusariose qu'une baisse des rendements. Mais, en fait, la plupart des cas de carence répertoriés jusqu'à présent dans ces sols coïncident avec des pH du sol élevés, de l'ordre de 7 ou plus. Il en est ainsi pour les caféiers Robusta dans les Uellés (Nord du Zaïre), où elles se manifestent uniquement sur les plages de sols à réaction neutre ou très légèrement alcaline (FRANKART et GROEGAERT, 1959).

On a évidemment cherché à quel niveau se situait *le seuil de carence*. Très vite, on s'est rendu compte qu'il fallait combiner pH du sol et teneur en manganèse. Dans un travail déjà ancien, SHERMAN et HARMER (1941) constatent qu'aux Etats-Unis 25 ppm de manganèse facilement réductible engendrent une déficience sur avoine en sol neutre, alors que ces mêmes 25 ppm en sols très acides ($pH < 5$) deviennent toxiques. Etudiant les carences en manganèse du caféier arabica dans un sol du Kivu au Zaïre, sol contenant toujours plus de 400 ppm de manganèse total, CULOT et VAN WAMBEKE (1958) n'ont pas remarqué de corrélation entre les carences chez le caféier et les teneurs en maganèse

échangeable du sol (0,8 à 2,8 ppm) ou faiblement réductible (14 à 35 ppm) du sol ; mais ils ont remarqué que les symptômes foliaires de carence en Mn n'apparaissaient que pour des pH égaux ou supérieurs à 6,4 (1) (ce sol se rapproche probablement plus d'un andosol que d'un sol ferrallitique).

Beaucoup plus que les teneurs en manganèse du sol, ce qui importe c'est la réaction du sol, principal facteur qui conditionne l'assimilabilité. C'est ainsi qu'à Ceylan des théiers s'alimentent normalement en manganèse dans des sols qui contiennent moins de 15 ppm de manganèse total (KALPAGE, 1967), teneur vraiment très basse. Il est vrai que le pH de ces sols est nettement inférieur à 5,0.

Etant donné cette prédominance du facteur pH du sol, le remède aux carences de manganèse sera plus une pulvérisation sur le feuillage qu'un apport au sol (qui risque ou de devenir inassimilable ou d'être toxique si l'apport est un peu trop important ou simplement mal réparti).

Toxicité

Tout d'abord, il apparaît bien acquis que les teneurs absolues du sol en manganèse (manganèse dit total) ont relativement peu d'importance sur les phénomènes de toxicité manganique (comme d'ailleurs sur les carences). Ce qui compte, c'est la conjonction entre pH et taux de manganèse, au moins dans les sols ferrallitiques où l'autre important facteur de l'assimilabilité du manganèse, les conditions réductrices, entre peu en jeu.

Déjà responsable des « taches stériles » en Ouganda (CHENERY, 1954), la toxicité manganique a provoqué une véritable catastrophe économique lors de la mise en valeur de la vallée du Niari, au Congo, au cours des années cinquante : quelques cycles culturaux ayant provoqué l'abaissement au-dessous de 5 d'un pH originellement à peine supérieur à 5, les rendements en arachides ont tellement décru que cette culture n'était plus rentable.

SHORROCKS (1964) constate des toxicités sévères du manganèse sur cacaoyers et légumineuses de couverture dans les sols issus de basalte de Malaisie dès pH 5. Il en est de même sur cotonnier en Côte d'Ivoire, ainsi que le rapporte BOUCHY (1970), précisément pour ce même pH 5.

Il suffit à Madagascar de relever à 5,2 le pH des sols issus de basalte pour pouvoir faire pousser du maïs (ROCHE, CELTON, VELLY, 1973) et à pH 5,5 pour soja, coton et haricot (IRAT, 1973). Dans le Campo Cerrado brésilien, on exige pH $\geqslant$ 5,5 pour le Phaséolus et pH $\geqslant$ 6,0 pour le Stylosanthès et le soja (MALAVOLTA, SARRUGE et BITTENCOURT, 1977). On pourrait multiplier de tels exemples. Il suffit de dire que les toxicités manganiques sont fréquentes et risquent d'être redoutables dès que le pH d'un sol (bien pourvu en manganèse total évidemment) s'abaisse au-dessous de 5,5-5,0 suivant le cas.

Seuil de toxicité du manganèse

On a précisé un peu plus haut que les toxicités manganiques dépendaient à la fois du pH et de la teneur en manganèse du sol. Effectivement, dans les exemples cités ci-dessus, les sols contiennent plusieurs centaines, parfois quelques milliers de ppm de manganèse total.

---

(1) Rappelons qu'en France, on considère qu'il y a risque de carence en manganèse, en particulier sur céréales, si :

— Mn échangeable (extrait à l'acétate d'ammoniaque neutre et normal) est inférieur à 1 ppm,

— Mn actif (extrait au réactif acéto-acétique pH 4,8 mélangé à 2 % de chlorhydrate d'hydroxylamine) est inférieur à 20-25 ppm, à condition que le pH du sol soit supérieur à 6 (DUVAL et MAURICE, 1971).

Il ne semble pas que l'on ait tenté de relier entre eux par un abaque à la fois pH, manganèse total, manganèse assimilable (au sens large) et symptômes de toxicité pour les plantes. Peut-être l'entreprise est-elle difficilement réalisable ?

Aussi doit-on se contenter de donner quelques exemples, qui, malheureusement, utilisent des méthodes analytiques fort diverses, pour estimer le manganèse responsable des phénomènes de toxicité :

— Mn extrait à l'acétate d'ammonium tamponné au pH du sol (FRANQUIN, 1958), symptômes de toxicité aiguë au Congo vers 10 à 13 ppm de Mn pour le cotonnier, 80 à 100 ppm pour l'arachide (pH du sol respectivement 5,1-5,2 et 4,4-4,6).

— Mn soluble à l'eau carbonatée (BOUCHY, 1970) (l'eau carbonatée est censée reproduire l'action des racines sur le sol). Des teneurs supérieures à 10 ppm provoquent le dépérissement des cotonniers en Côte d'Ivoire (pH du sol 5,0).

— Mn échangeable extrait à l'acétate d'ammonium neutre et normal. En Tanzanie, il semble y avoir début de toxicité sur sisal avec 100 ppm de manganèse échangeable pour un pH Cl_2Ca du sol de 4,4 (ce qui correspond à un pH H_2O un peu supérieur à 5,1) (MANDRA, 1973).

— Au Brésil, une affection du cotonnier, d'abord confondue avec une virose, est en réalité due à un excès de manganèse dans le sol (COSTA et *al.*, 1977). Cotonniers sains : pH du sol 5,1 à 5,6, Mn échangeable 20 ppm ; cotonniers malades : pH du sol 4,6 à 4,9, Mn échangeable 40 ppm.

A titre de comparaison, rappelons qu'en France on considère que le seuil de toxicité du manganèse « actif » (c'est-à-dire extrait au réactif acéto-acétique de pH 4,8 mélangé à 0,2 % de chlorhydrate d'hydroxylamine) se situe vers 100 ppm dans les sols de Bretagne, mais uniquement si le pH de ces sols est inférieur à 5 (COPPENET cité par DUVAL et MAURICE, 1970).

Discussion

Les carences en manganèse sont rares, pratiquement exceptionnelles, dans les sols ferrallitiques. Elles n'apparaissent guère que sur les sols où le pH, pour une raison ou une autre (ne serait-ce qu'une accumulation de cendres), atteint et surtout dépasse 7. Et encore n'affectent-elles que des plantes sensibles à une réaction alcaline comme le caféier.

Il semble par contre utile de revenir sur la question des seuils de toxicités. La multiplicité des méthodes d'analyse, déjà signalée au chapitre VIII pour les formes autres que le manganèse total, engendre une grande confusion. A tel point qu'il est à peu près impossible de fixer une teneur « critique » sans faire référence à un auteur donné, lequel utilise très souvent un procédé analytique personnel, ou, même, fort discutable dans son principe (comme l'extraction du Mn dit échangeable par une solution neutre) si l'on considère l'objectif proposé.

Aussi, comprend-on la tendance des agronomes à se fier surtout au pH afin de prendre toute garantie contre les manifestations de la toxicité manganique. Dès que la réaction du sol atteint et dépasse pH 5,5, ces accidents ne se manifestent pratiquement plus. Il faut des sols particulièrement chargés en manganèse total (de l'ordre du millier et plus de ppm) et l'apparition de conditions réductrices (sol argileux compacts par exemple) pour que certaines plantes, très sensibles comme le soja ou le cacaoyer, soient affectées dans ce cas (sans doute est-ce pour cette raison que SHORROCKS (1964) recommande en Malaisie un pH de 6,5 pour le cacaoyer afin de parer à toutes éventualités).

8.4. MOLYBDENE

Il semble que ce soit LAVOLLAY qui, vers 1939, montra que, chez les végétaux supérieurs, comme pour Aspergillus niger, le molybdène est indispensable comme catalyseur de

l'enzyme chargé de la réduction des nitrates en sels ammoniacaux. Cette date tardive dans la prise de conscience du rôle du molybdène est excusable, car on a vu qu'il était parmi les oligo-éléments essentiels, l'un des moins abondants : 0,2 à 10 kg/ha tous sols confondus d'après SULLIVAN (1972). On peut ajouter que les sols ferrallitiques ne se trouvent pas parmi les sols les plus riches en cet élément, ni d'ailleurs parmi les plus dépourvus ; en somme, il se trouvent dans une situation moyenne.

Carences et toxicités

Il ne semble pas qu'on ait répertorié des cas de toxicité du molybdène dans les sols ferrallitiques, sauf situations ou circonstances tout à fait exceptionnelles.

Par contre, des déficiences ou carences existent. Elles sont évidemment plus fréquentes sur légumineuses en raison du caractère indispensable que revêt cet élément pour les rhizobiums des nodosités.

Bien souvent, en raison de la dynamique particulière du molybdène (rappelons que l'assimilabilité diminue si le pH baisse), on constate que les carences se développent en terres déjà acides et principalement sur les sols en voie d'acidification rapide pour une raison ou une autre. MALAVOLTA (1967) signale un cas de cette sorte sur choux-fleux (le choux ne « pomme » pas et ses feuilles se réduisent pratiquement à la nervure centrale, d'où la pittoresque appellation anglaise de « whip-tail ») dans les « latossolos » rouges très acides de l'Etat de São Paulo (Brésil) et BHANGHOO et KARON (1962) un autre cas sur bananier au Honduras. On pourrait évidemment citer quelques exemples supplémentaires ; cela paraît inutile. Le plus souvent, il suffira d'un chaulage pour corriger très avantageusement ces carences en molybdène (en même temps que l'acidité du sol).

Une des rares circonstances où il y eut déficience absolue (ou presque) en molybdène en sols ferrallitiques fut signalée en Ouganda par FORSTER (1970) : un des sols concernés, contenant 7 mé/100 g de calcium échangeable avec un pH de l'ordre de 6, a répondu très favorablement au molybdène, ce qui n'empêcha pas qu'un chaulage sur soja dans un sol analogue encore mieux pourvu en calcium (17 mé/100 g) et bénéficiant d'un pH de l'ordre de 5,8 ait provoqué une nette libération de molybdène assimilable.

Correction des carences — Valeurs-seuils

Il est évidemment très difficile de parler des taux critiques de carence à propos du molybdène. La faiblesse des teneurs dans le sol, qu'il s'agisse du molybdène total et surtout du molybdène assimilable rend cette détermination assez illusoire. Il faut ajouter que l'analyse du molybdène extractible se révèle assez délicate et imprécise... justement pour cette même raison.

MALAVOLTA (1967) cite à tout hasard des chiffres de 0,04 à 0,12 ppm de molybdène assimilable (extrait à l'oxalate d'ammonium) qui correspondent à des carences en cet élément dans les sols d'Islande, mais n'ose évidemment pas les transposer au... Brésil sans vérification sur place.

Dans un domaine tout de même plus proche de la zone tropicale, deux sols d'Australie, de pH 5,3, connus pour être déficients en molybdène, possèdent respectivement 0,07 et 0,08 ppm de molybdène dit assimilable (WALKER, ADAMS et ORCHISTON, 1954).

En ce qui concerne les sols ferrallitiques, AUBERT et PINTA (1971) citent :

— Dahomey : sol « faiblement » ferrallitique, Mo total > 1 ppm,

— R.C.A. : sols faiblement ferrallitiques, Mo total : traces à 3 ppm,

— Madagascar : sols rouges ferrallitiques, Mo total 8 à 17 ppm,

sans d'ailleurs que l'on fasse référence au pH de ces sols (il n'est pas dit si ces sols sont ou ne sont pas en état de déficience molybdique).

On peut se demander dans quelle mesure ces teneurs en molybdène, qu'il soit total ou « assimilable » ou « extractible », ont un intérêt quelconque pour l'interprétation des analyses. En effet, le molybdène réellement absorbé ou éventuellement absorbable par les plantes est tellement dépendant du pH du sol qu'il est très difficile de tirer une conclusion, même approximative, des chiffres précédents (1).

D'après un exemple provenant de la littérature agronomique, 3,5 ppm de molybdène assimilable (extrait à l'oxalate de NH_4) sont souvent tout juste suffisants pour les plantes en sol très acide (pH de l'ordre de 4,5), alors que la même teneur à pH 7,0 ou plus peut se révéler toxique pour le bétail qui broute l'herbe poussant sur ce sol (JUSTE, 1970). Afin de rassurer les éleveurs qui désirent chauler leurs pâtures, on peut les assurer qu'un accident de ce genre est extrêmement rare, sinon tout à fait exceptionnel, en conditions tropicales humides.

Pour toutes ces raisons, plutôt que de demander des analyses coûteuses, de résultat incertain et difficilement interprétable (2), les agriculteurs préfèrent, dès qu'ils constatent les symptômes d'une carence molybdique, épandre du molybdate d'ammonium à raison de 5 à 10 kg par hectare. Le plus souvent, l'addition de 1 ppm de molybdène suffit. On utilise aussi les pulvérisations sur le feuillage.

Un autre procédé, plus coûteux, mais d'une efficacité moins spécifique — car il agit sur les toxicités (Mn et Al) et « enrichit » le sol — est l'apport d'amendements calco-magnésiens. Il n'y a qu'un nombre infime d'exemples où ceux-ci n'ont pu provoquer d'amélioration spectaculaire de la nutrition molybdique des cultures en cas de déficience.

8.5. BORE

Le bore est l'un de ces oligo-éléments dont la nécessité pour les plantes fut reconnue très tôt, naturellement par Gabriel BERTRAND qui ne put emporter la conviction de ses contemporains au début du siècle ; mais très vite un de ses collaborateurs, AGULHON avait dès 1910 conclu qu'il était utile aux plantes supérieures.

Il fit l'objet entre les deux guerres mondiales de nombreux travaux portant, en particulier, sur les carences en bore de la betterave (maladie dite du « cœur de la betterave »). Il n'est donc pas étonnant qu'on ait retrouvé un certain nombre d'accidents provoqués par le bore dans les sols ferrallitiques, plus d'ailleurs sous forme de carences que de toxicités.

Carences et toxicités

Toxicité

Les toxicités provoquées par un excès de bore dans le sol sont surtout fréquentes en zones arides, soit par suite d'une teneur excessive « naturelle » en bore des sols (au Moyen Orient surtout), soit encore lorsque les eaux d'irrigation sont chargées en cet élément comme en Californie (HATCHER et BOWER, 1958). Rien dans tout cela ne concerne les sols ferrallitiques.

---

(1) Il ne faut pas oublier que le molybdène dit assimilable est le plus souvent extrait à pH acide (mélange acide oxalique-oxalate de NH_4-pH 3,3). Aussi on peut légitimement se demander si le molybdène réellement assimilable à pH 6 ou 7 n'est pas transformé en molybdène non assimilable (au moins en partie) par le réactif d'extraction, ceci dans le récipient qui sert à l'attaque.

(2) L'auteur de ces lignes n'a pas eu connaissance jusqu'à présent de diagrammes précis permettant de connaître la quantité de molybdène présumé assimilable en fonction du pH ; au contraire même, les formes des rares courbes qu'il a pu consulter à ce propos sont tellement imprécises et divergentes qu'il apparaît difficiles d'en tirer une conclusion valable.

En effet, du fait de la sensibilité de cet élément à la lixiviation, les toxicités du bore entre les tropiques seront surtout dues à des apports répétés d'engrais minéraux (il ne faut pas oublier que les phosphates et superphosphates contiennent toujours une certaine quantité de bore), mais restent exceptionnelles. Seuls des apports de bore cumulés seront nocifs ; et cette nocivité affectera surtout les sols des régions semi-arides (FRITZ et VALLERIE, 1971 au Nord Cameroun ; HEATHCOTE et SMITHSON, 1974 au Nord du Nigéria), donc en dehors du domaine ferrallitique.

Un des rares cas de toxicité du bore dans les sols de la zone équatoriale humide fut relaté par SHORROCKS (1964) à propos d'hévéas poussant sur des sols sableux issus d'un granite acide en Malaisie.

Carences

Etant donné la sensibilité du bore à la lixiviation, il n'est pas étonnant de constater d'assez nombreux cas de carence et déficience.

L'une des premières manifestations connues de cette affection fut décelée vers 1950 au Congo où l'Elaeïs guineensis augmenta sa production de 40 % après une application de borate (FERRAND, BACHY, OLLAGNIER, 1951). Les symptômes de cette maladie (en particulier feuilles réduites en longueur et largeur, d'où le nom anglais de « little leaf desease ») furent retrouvés ensuite au Zaïre (BROESHART, FERWEDA, KOVACHICH, 1957), au Cameroun, en Côte d'Ivoire (OLLAGNIER et VALVERDE, 1968 ; MARTIN, 1969), et surtout en Malaisie où cette affection semble avoir été particulièrement étudiée (TURNER et BULL, 1967 ; RAJARATNAM, 1973 ; RAJARATNAM et LAW-ING-HOCK, 1975). Il faut d'ailleurs, dans la pratique, distinguer carences dues à une insuffisance du bore du sol et celles qui résultent de l'antagonisme Potassium-Bore développé après une fumure potassique (QUILLON, 1967 au Cameroun ; TURNER, 1967 au Sabah). Le cocotier n'est pas plus épargné que le palmier à huile (MANCIOT, OLLAGNIER, OCHS, 1980).

On a insisté volontairement ici sur le cas du palmier à huile, non seulement parce que cet arbre fut l'occasion de la première découverte, semble-t-il, d'une carence en bore dans le domaine ferrallitique, mais surtout parce qu'il est tout à fait caractéristique du cheminement des connaissances : à partir du moment où un symptôme net est mis en évidence, on le retrouve peu à peu en d'autres lieux et, une dizaine ou une vingtaine d'années après, on finit par conclure à la quasi-universalité d'une affection qu'on croyait cantonnée en un endroit bien déterminé.

Il est évident que les autres plantes cultivées ne sont pas à l'abri des carences en bore, d'autant plus qu'avec STILES (cité par ELMER et GOSNELL, 1963), on pense que les dicotylédones ont besoin de nettement plus de bore que les monocotylédones. Voici un nombre volontairement réduit d'exemples de carences et déficiences en bore dûment constatées mais limitées à la zone ferrallitique d'Afrique :

– cotonnier	BOUCHY (1970) en Côte d'Ivoire,
– caféier arabica	CHENERY (1954) en Ouganda, CULOT et VAN WAMBEKE (1958) au Zaïre,
– théier	CHENERY (1958) en Ouganda sur cultures en pots ; pas de carence au champ,
– sisal	DIEKMAHNS (1957) en Tanzanie,
– cacaoyer	EGBE et OMOTOSO (1972) au Nigéria,
– eucalyptus	SAVORY (1962) et COOLING et JONES (1970) en Zambie, BIROT (1967) en Haute-Volta et au Congo,
– Pinus sq.	PROCTER (1965) en Tanzanie,
– Acacia mearnsii dit acacia « wattle »	COOLING et JONES (1970) en Zambie et au Malawi,
– Grevillea robusta etc.	SMITH (1960) au Kenya.

Bien souvent, ce sont les espèces utilisées pour la reforestation qui sont les plus touchées par des carences très sévères (mort du bourgeon terminal et nécrose descendante à partir de la cime de l'arbre, d'où l'appellation anglaise très évocatrice de « die-back »), vraisemblablement parce qu'établies sur des sols pauvres le plus souvent sableux.

Une caractéristique générale : sur les espèces pérennes, les carences et déficiences en bore se développent surtout en période sèche et régressent dès le retour des pluies.

Teneurs-limite en bore du sol

Seuil de toxicité

Les cas de toxicité en bore sont trop peu fréquents en sols ferrallitiques pour qu'on puisse déterminer un seuil critique de bore du sol.

A titre de comparaison, il est possible de citer le chiffre de 2 ppm de bore extractible à l'eau chaude retenu par HEATHCOTE et SMITHSON (1974) comme seuil de toxicité pour le cotonnier et diverses plantes cultivées — en principe toutes sensibles au bore — dans les sols ferrugineux tropicaux du Nord du Nigéria. C'est à une teneur plus faible qu'avaient abouti FRITZ et VALLERIE (1971) qui ont constaté que des apports de bore par les engrais devenaient toxiques pour le cotonnier si le total cumulé atteignait 2 kg/ha de bore dans les sols du Nord Cameroun. Il ne semble pas qu'il s'agisse d'un cas général, car des apports de 2 à 3 kg/ha de bore n'ont montré aucune nocivité pour le cotonnier, le sorgho, le maïs et l'arachide dans les sols du Nigéria septentrional. Bien évidemment, aucun de ces exemples ne concerne les sols ferrallitiques étant donné leur localisation géographique...

Seuil de carence

Le bore offre l'exemple d'un oligo-élément pour lesquels la communauté scientifique fait montre d'un large consensus en ce qui concerne la détermination du seuil de carence — le fait est assez inhabituel pour être signalé — :

— consensus pour l'extraction du bore, c'est la méthode dite « à l'eau chaude »,

— consensus pour la fixation de la teneur seuil, que l'on situe vers 0,10 à 0,20 ppm de bore extractible à l'eau chaude.

C'est d'ailleurs entre ces deux valeurs que OLLAGNIER, OCHS et MARTIN (1970) trouvent des Elaeïs souffrant de déficience en bore, tandis que pour 0,30 ppm il n'y a que des arbres sains. Même constatation faite par SMITH (1960) sur Grevillea robusta au Kenya : 0,13 ppm carence ; 0,20 ppm arbres sains, etc. Et ceci correspond au chiffre trouvé pour les cotonniers du Mississipi : seuil critique entre 0,10 et 0,16 ppm (MURPHY et LANCASTER, 1971).

Discussion

Il y a peu à dire sur les phénomènes de toxicité, à vrai dire fort rares en sols ferrallitiques (le bore est très sensible à la lixiviation). Par contre, il semble opportun d'insister, à propos des carences, sur le fait que le seuil-critique n'est pas une notion statique.

On doit ajouter des considérations tirées de la dynamique du bore dont l'assimilabilité décroît si le pH augmente. Ceci explique sans doute pourquoi EGBE et OMOTOSO (1972) trouvent au Nigéria des cacaoyers déficients en bore sur des sols ayant jusqu'à 0,40 ppm de bore extractible à l'eau chaude ; effectivement, les sols du « Cocoa Belt » habituellement très bien saturés en bases ont des pH très proches de la neutralité, sinon neutres. A ce propos, on peut rappeler qu'en France le seuil d'apparition des carences en bore sur lin et betterave se situe à 0,10 ppm de bore (extrait à l'eau chaude) dans les sols de pH 6,8, mais à 0,90 ppm de bore pour un pH de 7,5 (DUVAL et MAURICE, 1970). Il est

évident que s'il y a chaulage et relèvement un peu trop brutal du pH en sols ferrallitiques, il peut y avoir diminution des disponibilités du sol en bore assimilable : le cas fut noté sur bananier entre autres (CHAPENTIER et MARTIN-PREVEL, 1967).

On doit cependant adoucir ces critiques pour constater que sur l'ensemble des sols ferrallitiques, dont les pH s'échelonnent le plus souvent de 4,5 à 6,5, le seuil critique de déficience en bore, tel qu'il a été défini plus haut, garde toute sa validité.

9. UN FACTEUR SYNTHÉTIQUE D'APPRÉCIATION DE LA FERTILITÉ : LE pH

9.1. DEFINITION

Le pH d'une solution est le cologarithme de la concentration en ions H^+. On le détermine dans les sols en ajoutant à ceux-ci une certaine quantité de liquide, eau distillée, solution contenant un sel (KCl ou $CaCl_2$) et en mesurant la conductivité électrique du mélange ainsi obtenu.

Les processus les plus utilisés sont :

– *Le pH H_2O*, 1 de sol pour 2,5 d'eau, est la détermination la plus fréquente ; en pays anglophones surtout, on utilise assez souvent la pâte saturée, soit à peu près 1 de sol pour 1 d'eau. Les différences sont habituellement assez faibles entre H_2O 1/2,5 et pâte saturée.

– *Le pH KCl* par mélange avec une solution normale de chlorure de potassium dans les mêmes proportions que précédemment. La différence pH eau – pH KCl, le plus souvent positive, est fonction de la quantité d'ions hydrogène libérés par réaction d'échange avec les ions hydrogène du complexe absorbant.

$$\text{Sol-H} + K^+ \rightarrow \text{Sol-K} + H^+$$

Bien souvent, dans les sols acides, il s'ajoute à cet hydrogène celui qui est libéré par l'hydrolyse de l'aluminium échangeable.

$$\text{Sol-Al} + 3\,K \rightarrow \text{Sol}\begin{matrix}\diagup K \\ - K \\ \diagdown K\end{matrix} + Al^{+++}$$

$$Al^{---} + 3\,H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3\,H^+$$

En sols ferrallitiques acides, la différence du pH H_2O et du pH KCl atteint souvent une unité pH. Si l'on veut déterminer l'acidité d'échange due au seul aluminium échangeable, on bloque Al sur un aliquot par du fluorure de sodium et on mesure l'acidité d'échange résiduelle (celle des ions H^+) : la différence indique l'acidité provenant de l'aluminium échangeable.

Il peut arriver que le pH KCl soit supérieur au pH H_2O : cela correspond habituellement à une grande richesse du sol en composés du fer et de l'aluminium (colloïdes électropositifs).

Certains auteurs anglophones mesurent le pH KCl avec une solution décinormale de chlorure de potassium : le pH ainsi déterminé est quelque peu supérieur à celui obtenu avec une solution normale.

– *Le pH $CaCl_2$* : cette mesure de pH, surtout effectuée par les chimistes anglophones d'Afrique orientale et d'Extrême-Orient, utilise une solution 0,1 N ou parfois 0,01 N de Cl_2Ca. Elle extrait les ions H du sol (il ne s'agit plus qu'un simple équilibre entre sol et eau comme pour le *pH H_2O*), donc donne des chiffres un peu inférieurs à ceux du *pH H_2O*. Par contre, elle ne touche pas aux ions aluminium.

Les correspondances entre pH H_2O et pH $CaCl_2$ sont souvent assez délicates à établir (souvent en ajoutant 0,70 unité-pH au pH $CaCl_2$, on obtient approximativement le pH H_2O pour un pH $CaCl_2$ de l'ordre de 4 à 6).

En conclusion, on peut affirmer que le pH H_2O est la méthode de beaucoup la plus utilisée : c'est en quelque sorte la méthode de référence pour mesurer la réaction des sols. Le pH n'est pas une donnée absolument stable dans les sols. Il varie au cours de l'année, le maximum étant atteint en saison sèche et le minimum se situant au creux de la saison des pluies. En sols ferrallitiques fortement argileux de la vallée du Niari (Congo), l'amplitude atteint 0,5 unité sous savane et 1 unité sous culture (MARTIN G., 1958). Il semble que ces variations s'atténuent assez sensiblement si le sol devient sableux. En outre, une pluviosité uniformément répartie tout au long de l'année ne les laisse guère apparaître. On lui ajoute souvent la mesure du pH KCl pour évaluer l'acidité potentielle (en particulier pour évaluer le risque de présence d'aluminium échangeable sur le complexe absorbant du sol). Et lorsqu'on parle de pH sans autre précision, c'est toujours du *pH H_2O* qu'il s'agit.

9.2. pH ET SATURATION EN BASES DU SOL

Lorsqu'on détermine le pH d'un sol, on effectue une mesure qui dépend de la concentration en ions H^+ du sol, soit $\frac{H}{T}$ %, et, par voie de réciprocité, du degré de saturation en bases $\frac{S}{T}$ % (ou V %). En fait, dans la plupart des sols, on n'observe pas de corrélation nette entre pH et V en raison d'un certain « coefficient de dissociation » des argiles (d'où apparition d'ions H^+ et Al^{+++} sur ces argiles « dissociées »).

Or, si cette dissociation est importante pour les smectites, illites et vermiculites, elle est pratiquement nulle pour la kaolinite, de telle sorte que les sols ferrallitiques forment l'exception la plus notable à cette règle.

On y observe une liaison assez étroite entre ces deux caractéristiques du sol (pH et V), bien mise en évidence par l'équation de régression établie par COMBEAU, OLLAT et QUANTIN (1961) pour l'horizon superficiel des sols ferrallitiques, en particulier ceux de la République Centrafricaine.

$$pH = 4{,}47 + 0{,}0260\ V\ \% \qquad r = 0{,}81$$

Un peu plus tard, VAN RAIJ et *al.* (1968) ont trouvé de bonnes corrélations entre le pH et le degré de saturation en bases des deux grandes catégories de sols ferrallitiques de l'Etat de São Paulo (Brésil), les « solos podzolizados » — équivalant en gros aux ultisols de la Soil Taxonomy et aux ferrallitiques appauvris en A (en argile) de la classification française — et les « latossolos » (à peu près les oxisols américains et certains ferrallitiques modaux français). Les équations de régression établies par ces auteurs sont les suivantes :

— Solos podzolizados

. Horizon superficiel (A)
$pH = 4{,}36 + 0{,}0262\ V\ \% \qquad r = 0{,}91$

. Horizon textural (B_2)
$pH = 4{,}12 + 0{,}0260\ V\ \% \qquad r = 0{,}89$

— Latossolos

. Horizon superficiel (A)
$pH = 4{,}49 + 0{,}0251\ V\ \% \qquad r = 0{,}92$

. Horizon B_2 («latossolico »)
$pH = 4{,}67 + 0{,}0256\ V\ \% \qquad r = 0{,}81$

Une valeur moyenne et simplifiée de l'équation de régression pourrait être (VAN RAIJ, com. pers.) :

$$pH = 4{,}5 + 0{,}025\ V\ \%$$

De fait, cette expression mathématique sert de base, le cas échéant, au calcul des besoins en chaux dans les sols ferrallitiques brésiliens. Du point de vue de la classification française qui prend pour les sols ferrallitiques le degré de saturation en bases comme critère de division en sous-classes, le pH peut servir en première approximation (bien souvent valable en définitive) à opérer un tri préliminaire dans les sols avant des analyses chimiques plus complètes.

TABLEAU XII.26 — *Correspondance entre pH et saturation en bases dans les sols ferrallitiques*

Brésil - Etat de São Paulo d'après VAN RAIJ (com. pers.)		Afrique Occidentale et Centrale d'après COMBEAU, SEGALEN, BACHELIER (1970)	
pH	V %	pH	V %
4,5	0	3,7-4,5	0 à 9
5,0	20	4,5-5,5	10 à 30
5,5	40	5,5-6,5	30 à 50
6,0	60	6,5-7 et +	60 à 80
6,5	80		
7,0 et +	100		

En ce qui concerne les degrés de saturation aux pH les plus élevés (pH 7 et plus), il semble que VAN RAIJ (tableau XII.26.) pèche par excès d'optimisme, car il est rare que des sols ferrallitiques même neutres (à pH = 7, ce qui est rare) montrent une saturation en bases supérieure à 80-90 % (qui est celle de certains ochrosols du Ghana, de quelques sols « à cacaoyers » de Côte d'Ivoire, etc...). Il est vrai que l'équation approchée brésilienne, base de cette correspondance, est surtout utilisée pour les opérations de chaulage où une trop grande précision se révèle très vite illusoire.

Cette correspondance entre pH et degré de saturation du sol en bases peut être fort utile au prospecteur, mais elle ne préjuge en rien du niveau absolu de ces bases dans le sol.

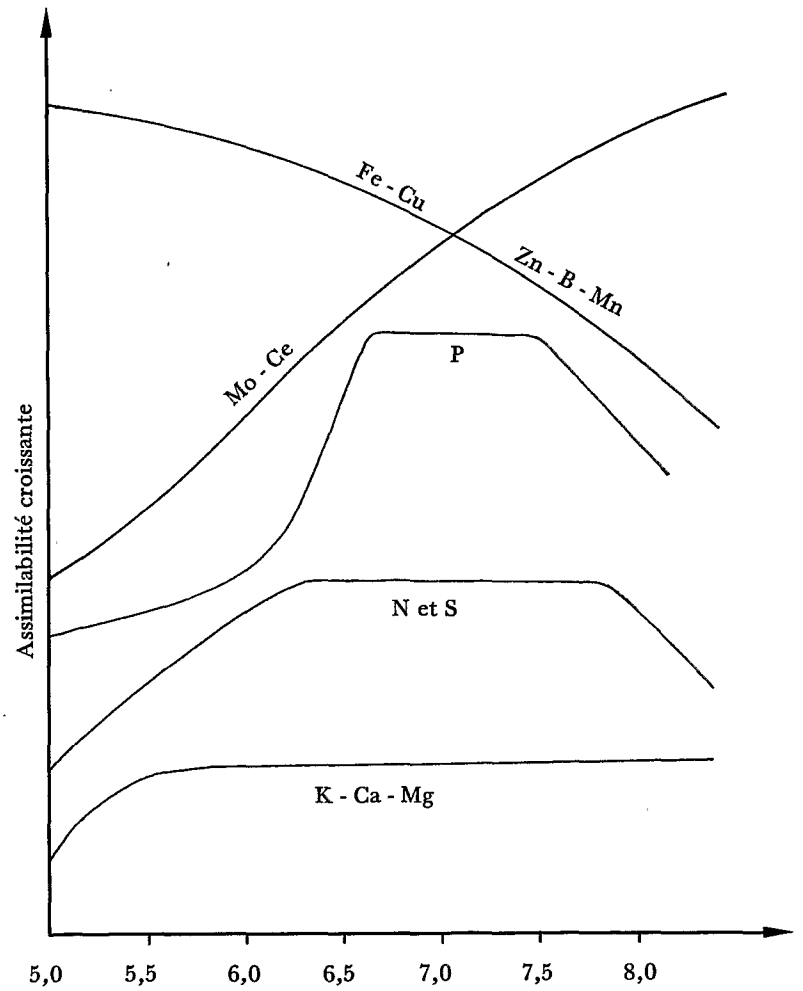
9.3. LE pH ET QUELQUES PROPRIETES DES SOLS

Les toxicités aluminiques et manganiques

Il suffit de consulter les paragraphes consacrés à la dynamique de l'aluminium et du manganèse (chap. X., p. 218 sq. et 225 sq.) pour constater que les toxicités engendrées par ces deux éléments n'existent pratiquement jamais pour des valeurs de pH supérieures à 5,2-5,5 en sols ferrallitiques ; ce qui, évidemment, ne veut pas dire qu'elles vont se produire automatiquement si le pH se situe en-dessous de ces chiffres (bien que la probabilité d'un tel accident soit élevée). Il y a tout de même une différence entre aluminium et manganèse : la proportion d'aluminium échangeable reste dans tous les cas une fonction directe du pH tandis que pour le manganèse assimilable, il s'y ajoute aussi le potentiel d'oxydoréduction. En fait, les sols ferrallitiques sont des sols « sains », bien aérés, où les sites engendrant des conditions réductrices sont rares, au moins en surface. Bien souvent, les incompatibilités des plantes pour des pH fortement acides ont pour cause principale la présence d'aluminium échangeable et de manganèse assimilable en fortes quantités dans le sol.

FIGURE 23

Schéma de l'assimilabilité des principaux éléments du sol en fonction du pH (tiré de MALAVOLTA, 1967)



N.B. Seules comptent les formes des courbes et non pas leurs positions les unes par rapport aux autres qui sont tout à fait arbitraires.

Le pH et l'assimilabilité du phosphore du sol

C'est une question qui fut largement traitée à propos de la dynamique du phosphore (chap. IX., p. 184 sq.). Rappelons simplement quelques points marquants :

— Le phosphore lié au calcium, forme hautement assimilable, n'existe en quantité appréciable que dans les sols peu acides (pH entre 6 et 7). Le pH n'en est pas la cause directe, mais est le reflet de l'abondance du calcium sur le complexe absorbant du sol.

— Le phosphore lié à l'aluminium est normalement assimilable par les plantes, mais cette assimilabilité décroît très fortement lorsque le pH s'abaisse au-dessous de pH 5.

— Le phosphore complexé par la matière organique est d'autant mieux libéré que celle-ci se minéralise plus vite, ce qui correspond également à des réactions du sol relativement peu acides (pH entre 5,5 et 7 pour les sols ferrallitiques).

En définitive, si le pH n'est pas la cause de l'assimilabilité ou de la non-assimilabilité du phosphore du sol, il en est un indicateur à ne pas négliger.

L'assimilabilité des oligo-éléments

Le pH du sol est le principal facteur qui régit l'assimilabilité des oligo-éléments :

— assimilabilité décroissante si le pH augmente pour la plupart d'entre eux (bore, cuivre, manganèse, zinc),

— assimilabilité croissante si le pH augmente, pour le seul molybdène.

C'est un point qui fut largement développé à propos de la dynamique des oligo-éléments (chap. X., p. 225 sq.) ; il apparaît inutile d'y revenir après ce simple rappel.

La matière organique et le cycle de l'azote

Dès que l'on envisage le problème de la matière organique dans les sols, c'est aussi toute la vie du sol que l'on prend en compte par la même occasion : bactéries, champignons, algues, vers de terre, arthropodes, etc.

Les bactéries ont normalement un rôle très important dans la décomposition et l'humification des matières végétales fraîches. Dès que le pH atteint 5 et surtout passe au-dessous de cette valeur, elles cèdent le pas aux arthropodes et surtout aux champignons dont l'action est moins complète, plus grossière : d'où les accumulations d'humus « brut » dans les sols ferrallitiques très acides.

On retrouve le même partage des tâches à propos de la minéralisation de l'humus : aux pH très acides, elle se fait lentement parce qu'assurée en grande partie par les champignons, puis s'accélère dès que le pH devient nettement supérieur à 5,0 lorsque les bactéries prennent le relais (cf. chap. IX., p. 165-169). Au point que l'on a pu baser une échelle de fertilité combinant pH et teneurs du sol en azote total (DABIN, 1961) (cf. p. 274-275).

9.4. LE pH DU SOL ET LES PLANTES CULTIVEES

Le comportement des plantes en fonction du pH

Lorsqu'on essaie de classer les plantes en fonction du pH, on distingue généralement :

— des plantes acidophiles, comme l'hévéa, le théier, l'ananas, l'herbe à maté, qui préfèrent des pH acides de 5,0 et au-dessous.

— des plantes faiblement acidophiles : elles supportent fort mal une réaction alcaline du milieu (risque de chlorose calcaire), mais possèdent une résistance moyenne à l'aluminium

échangeable qui se traduit souvent par des baisses de rendement. C'est le cas du manioc, du bananier, du palmier à huile, du caféier...

— des plantes neutrophiles comme le cacaoyer, le soja, l'arachide, le cotonnier, le pyrèthre, qui supportent parfaitement des pH alcalins, de l'ordre de 7,2-7,5 : en fait, il s'agit surtout d'espèces craignant l'aluminium échangeable. Elles prospèrent donc jusque vers pH 5,5 et parfois même à des pH un peu inférieurs. Le cacaoyer, réputé aimant les sols neutres, peut survivre à pH 4,0 à condition qu'il n'y ait ni manganèse assimilable, ni aluminium échangeable en quantités importantes dans le sol.

— des plantes indifférentes, à la fois résistantes à l'alcalinité du sol et à l'aluminium échangeable ; de ce fait, elles admettent une très large gamme de pH. On peut citer dans cette catégorie la canne à sucre, le riz, le maïs, le cocotier, etc.

Conditions de pH acceptables pour les plantes cultivées

TABLEAU XII.27. — *pH du sol et plantes cultivées*

Plante	Intervalle de tolérance de pH	pH optimum limitation nulle à faible	Source
Ananas	4,0-6,5	4,5-5,0	MARTIN-PREVEL et DUGAIN (1962) GODEFROY, LACOEUILHE et MARCHAL (1976)
Arachide	4,2-7,5	6,0-7,0	FAUCK (1956-a) FRANQUIN et MARTIN (1962)
Bananier	4,0-7,0	5,5-6,0-6,5	CHAMPION et *al.* (1958)
Cacaoyer	4,0-8,0	6,0-6,5-7,5	HARDY (1960), SMYTH (1966), JADIN (1972)
Caféier	4,5-7,0	5,5-6,0-6,5	FRANKART et GROEGAERT (1959) CULOT et VAN WAMBEKE (1958)
Canne à sucre	4,0-8,9	6,0-8,0	FAUCONNIER (1962) ; GUILLAUME (1962)
Cocotier	5,0-8,0	5,8-7,0	FREMOND, ZILLER, NUCE de LAMOTHE (1966)
Cotonnier	5,2-8,0	6,6-7,5	BOUYER et DABIN (1963), FORSTER (1971) FRANQUIN et MARTIN (1962), KILIAN (1964)
Haricot (Phaseolus)	5,0-7,5	5,4-7,0	
Hévéa	3,2-6,0	4,3-4,5-5,0	CHAN et PUSHAPARAJAH (1972) CHAN HEUN YIN et *al.* (1977)
Maïs	3,7-8,0	5,4-7,5	CELTON, ROCHE et VELLY (1973) SEMENT (1980)
Manioc	4,0-7,0	5,5-6-6,5	DABIN (1956)
Mil pennisetum	4,0-8,0	5,0-7,5	PIERI (1976-a)
Palmier à huile	3,2-7,0	4,0-6,0	NG SIEW KEE (1968)
Patate douce	5,25-7,5	6,0-7,0	FORSTER (1970)
Pyrèthre	5,5-7,8	6,5-7,2	DELHAYE (1970)
Riz	3,8-8,4	5,5-6,0-6,5	TOMLINSON (1957-a), GRANT (1964) BOUYER et DABIN (1963)
Soja	4,8-7,5	5,2-7,0	RAMOS et DEBECEK (1979)
Théier	3,9-6,5	4,5-5-5,6	CHENERY (1954), BONTE (1967), WILLSON (1969), SMITH (1963)

Lorsqu'un chiffre se trouve intercalé au milieu de la gamme des pH optimum, il indique un optimum signalé par un des auteurs. Les limites de tolérance représentent en moyenne les conditions extrêmes de survie sans référence particulière au volume des récoltes qui peuvent être nulles, faibles ou encore acceptables suivant le cas.

Lorsqu'on cherche à rendre compte de l'influence du pH sur une plante cultivée, il faut avoir présentes à l'esprit deux notions :

— un intervalle de pH optimal : entre les deux valeurs-limite qui l'encadrent, la plante aura une productivité maximale, toutes autres conditions égales par ailleurs,

— un intervalle de tolérance qui, dans le cas général, s'étale de part et d'autre de l'intervalle optimal. La productivité y est inférieure à celle du cas précédent ; parfois la plante y est en état de survie ; parfois à la suite d'une caractéristique particulière du sol (peu d'aluminium échangeable à bas pH par exemple) elle peut donner une production. D'où le tableau XII.27. qui répertorie les conditions de pH les plus communément admises pour un certain nombre de plantes cultivées. Malgré le soin mis à l'établir, il ne peut avoir un caractère absolu, même dans une classe bien précise de sols comme les sols ferrallitiques : par exemple, à pH égal, les quantités d'aluminium échangeable ne sont pas exactement les mêmes dans un sol à kaolinite *sensu stricto* et dans un sol à métahalloysite, dans un sol fortement organique et dans un sol surtout minéral, d'où des différences dans le comportement d'une plante pour un même pH.

Ces différences s'accentuent si on change de catégorie de sol : ainsi en sols ferrallitiques (Côte d'Ivoire), le rendement de l'ananas commence à baisser si le pH s'élève au-dessus de 5,0, alors qu'en sols andiques (Cameroun), la production est très satisfaisante pour des pH de 6,0 à 6,5.

Les échelles de limitations (plus précises que le tableau XII.27. qui revêt un caractère général) représentent une démarche complémentaire pour intégrer le pH aux caractéristiques culturales du sol. Elles ne sont valables, si on les prend au pied de la lettre, que pour un terroir donné, mais peuvent donner de bonnes indications ailleurs. On citera ici celle que CHANG HEUN YIN et *al.* (1977) ont établi pour l'hévéa en Malaisie (tableau XII.28) :

TABLEAU XII.28. — *pH et limitations agricoles pour l'hévéa en Malaisie d'après* CHANG HEUN YIN *et* al. *(1977)*

Limitation nulle	pH 4,3 à 4,6	Moyenne 4,5
Limitation faible à moyenne	pH 4,6 à 5,0	
Limitation forte	pH 5,0 à 6,0	
Limitation très forte	pH > 6,0	

Appréciation des propriétés agricoles d'un sol par le pH

Le pH synthétise, mais d'une façon assez approximative, un certain nombre de caractéristiques, en particulier la saturation en bases du complexe absorbant.

Pour cette raison, et bien qu'il puisse varier au cours de l'année, le pH des sols mesuré à l'eau distillée est une donnée très largement utilisée pour évaluer grossièrement les possibilités agricoles :

pH < 5,0-5,2	sol très acide avec risques de toxicité aluminique et manganique ; convient surtout aux plantes acidophiles (hévéa, théier, ananas, passiflore, melinis) et à certaines plantes tolérantes, manioc, maïs, riz, bananier... avec, souvent, des baisses de rendement.
pH voisin de 5,5 (en fait de 5,2 à 6,0)	sol acide convenant à la plus grande partie des plantes cultivées. Risques d'acidification après quelques années de culture. Les plantes acidophiles peuvent encore être cultivées jusque vers 5,5.
pH 6,0 à 7,0	sol bien saturé en bases, convient à pratiquement toutes les cultures.
pH 7,0 à 8,0	sol contenant des sels libres, le plus souvent du calcaire ; il y a donc risques de chlorose calcaire pour les plantes sensibles.

L'éventualité de rencontrer des sols ferrallitiques à réaction franchement alcaline est très faible, à moins que l'élévation du pH soit causée par une accumulation de cendres provenant de l'incinération de la végétation primitive. Par contre, lorsque la roche-mère est un calcaire ou une roche franchement basique (diorite, basalte), on peut avoir un horizon A très légèrement acide (pH 6,5 à 6,9) combiné avec un sous-sol neutre ou légèrement alcalin (pH 7,0 à 7,2). Il s'agit souvent là de sols exceptionnellement fertiles, malheureusement assez rares.

10. CONCLUSION

Ainsi que le lecteur a pu s'en rendre compte, on s'est efforcé, dans tout ce chapitre, de donner des indications pratiques susceptibles de guider le prospecteur ou l'utilisateur.

Ce sont des échelles de fertilité — ou de limitations agricoles — pour l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium ou le magnésium. Ce sont aussi des valeurs-seuil ou des valeurs-critiques qui se situent un peu comme des repères : 25 ou 50 ppm pour le phosphore assimilable (méthode Bondy) suivant le pouvoir fixateur du sol, 0,10 mé/100 g pour le seuil de carence du potassium échangeable, 0,20 mé/100 g en moyenne pour le seuil de déficience de cet élément, 0,40 mé/100 g pour le magnésium échangeable. Evidemment, les renseignements deviennent plus flous lorsqu'il s'agit d'oligo-éléments, mais, malgré tout, on trouve un certain nombre de données auxquelles se raccrocher avec plus ou moins de certitude. Enfin, des considérations sur l'aluminium échangeable et le pH permettent de délimiter des domaines de fertilité.

Bien sûr, il faut aussi tenir compte de la dynamique des éléments et des équilibres qu'ils développent entre eux pour juger sainement des potentialités agricoles d'un sol.

Mais on doit aussi tempérer l'ardeur de ceux qui voudraient utiliser de façon un peu trop systématique et absolue ces renseignements. Tout d'abord, leur présentation est trop didactique pour être tout à fait vraie dans tous les cas : la nature s'accommode parfois mal de se trouver « enfermée » entre deux limites. On a vu que la composition granulométrique des sols influait assez largement sur les valeurs-repères (échelles ou teneurs critiques) et les résultats exposés ici essaient d'en tenir compte. Mais a-t-on donné à ce facteur une importance trop faible ou au contraire disproportionnée avec la réalité ? On ne sait trop ! Car c'est un sujet qui fut assez rarement abordé par les agronomes et donc insuffisamment étudié. Mais il existe probablement des propriétés particulières des sols qui influent considérablement sur la fertilité et que l'on connaît encore mal ou pas du tout (rappelons que ce n'est guère qu'au début des années soixante que l'on a « réellement » pris conscience de l'importance des hydroxydes de fer sur la dynamique et l'utilisation du phosphore du sol). Il faut donc à tout prix éviter l'attitude intellectuelle « tout est connu », parce que l'on a à sa disposition un certain nombre de recettes, établies consciencieusement certes, mais dont la validité n'est pas garantie en tout lieu et toute circonstance.

En outre, la micro-variabilité, parfois considérable, des propriétés chimiques d'un sol suivant le lieu doit rappeler chacun à la modestie. Jamais on ne peut être absolument certain que l'échantillon analysé soit totalement représentatif de l'aire qu'il est censé caractériser. Ce problème de l'échantillonnage a souvent été soulevé, mais on doit l'avoir constamment à l'esprit en interprétant une fiche d'analyses de sol.

Il serait dangereux aussi de faire fi des relations entre la plante et son milieu. Par exemple, plus elle s'enracinera en profondeur, plus elle aura de chances de se soustraire plus ou moins à toutes ces valeurs-critiques ou ces seuils de carence et de déficience, qui, rappelons-le, sont établis pour l'horizon superficiel, soit en gros les 15 à 20 centimètres supérieurs du sol. Cas sans doute extrême, on a signalé en Afrique du sud que des cotonniers poussaient allègrement sur des sols ayant moins de 0,10 mé/100 g de potassium

échangeable, et ceci tout simplement parce que non seulement le pivot de cette plante pouvait s'enfoncer profondément dans le sous-sol, mais aussi parce que les radicelles absorbantes montraient une tendance nette à s'infléchir vers le bas en raison de « coups de sécheresse » accusés par la surface du sol, alors qu'en profondeur, il y avait encore une humidité abondante ; or l'horizon situé au-dessous de la couche travaillée possédait de bonnes teneurs en potassium échangeable, outre une porosité très suffisante pour qu'il soit facilement pénétré par les racines.

Ces considérations ont simplement pour but de rappeler que tout savoir est relatif et que tout prospecteur, tout agronome, se doit de confronter son bagage de connaissances avec la réalité. Elles n'infirment en rien ce qui est développé dans ce chapitre.

conclusion générale

1. GÉNÉRALITÉS

Un philosophe de l'antiquité grecque à dit quelque part qu'à chaque étape importante, et, à plus forte raison, au terme d'un ouvrage quelqu'il soit, il fallait savoir s'arrêter, regarder en arrière sans indulgence et tirer les conclusions qui s'imposaient.

Il semble que le moment soit venu, avant de mettre un point final à ce document sur la fertilité des sols ferrallitiques, de se retourner sur le travail déjà effectué et d'essayer d'en soupeser autant que faire se peut, d'une part, les insuffisances non pour les justifier ou les excuser, mais pour montrer au lecteur que les connaissances en agronomie tropicale sont encore imparfaites et qu'en outre il fallait faire des choix (il n'était pas possible de tout dire) et, d'autre part, les acquis incontestables qui ont fait progresser ces mêmes connaissances de façon considérable depuis trois à quatre décennies.

On a beaucoup parlé tout au long de ces pages de facteurs de fertilité, de limitations ou de contraintes agricoles (termes qui, dans l'esprit de l'auteur se présentent à peu près comme le positif et le négatif d'une photographie). Il paraît utile, maintenant, de tenter très sommairement de déterminer de quels poids relatifs « pèsent » ces divers facteurs lorsqu'on veut évaluer le potentiel de fertilité des sols ferrallitiques.

2. LES INSUFFISANCES

Celles-ci ont deux origines : d'une part nos connaissances incomplètes sur tous ces processus complexes qui régissent les phénomènes biologiques et pédologiques (l'agronomie ne fait pas exception) et d'autre part la volonté de ne pas trop alourdir cet ouvrage en y ajoutant une partie supplémentaire, au moins aussi importante que celle déjà exposée, concernant spécifiquement l'évolution des sols sous cultures et le travail du sol.

2.1. LES CONNAISSANCES INCOMPLETES

Il y aurait beaucoup à dire sur ce sujet ! en particulier, que tout savoir est relatif et qu'il est sans cesse remis en cause !!

A l'appui de ces prémices fort pessimistes, il est possible de souligner quelques domaines où le prospecteur et l'agronome ont beaucoup de difficultés à obtenir les données qui leur sont nécessaires.

C'est le cas des propriétés physiques des sols où on ne dispose qu'assez rarement de chiffres précis caractérisant la structure des sols ainsi que leurs constantes hydriques — perméabilité, eau utile, bilan hydrique —.

Bien souvent les méthodes d'analyse existent. Mais il arrive que certaines soient ignorées d'une partie importante des spécialistes du sol : c'est le cas, par exemple, du test HENIN d'Instabilité Structurale inconnu des analystes anglophones — ou formés par ces derniers —, malgré une « fiabilité » indiscutable pour apprécier la valeur structurale d'un sol.

Plus généralement la mise en œuvre des processus d'analyses en physique des sols, qu'il s'agisse de la perméabilité, de l'eau utile, de la porosité, de la structure, est lourde, fastidieuse et, de ce fait, décourageante pour les spécialistes qui ont l'intention de les utiliser. Travailler en ce domaine demande une patience, une minutie, une rigueur dans l'expérimentation qui exige en quelque sorte une tournure d'esprit particulière. Aussi en arrive-t-on à une situation paradoxale : dans presque tout les rapports de prospections, on dispose en abondance des valeurs de calcium, magnésium et potassium échangeables ainsi que de l'azote total des sols, mais on ne sait pratiquement rien sur leur perméabilité, leur porosité, leur capacité en eau utile, la stabilité structurale de leurs agrégats...

Il était inévitable qu'un ouvrage sur la fertilité des sols ferrallitiques se ressente de cette lacune. Reconnaissons toutefois que, depuis une decennie, il y eut un net progrès dans nos connaissances sur la structure et sur la porosité des sols ferrallitiques.

Il est un autre domaine où, faute d'études de base, on n'a que des renseignements partiels tout à fait insuffisants : c'est celui de la dynamique de corps comme l'azote, le phosphore, le soufre, et même les bases échangeables, surtout dans la mesure où ces corps sont liés pour une part importante à l'évolution de la matière organique du sol. Car, jusqu'à présent, on sait encore mal faire la différence — du point de vue de la fertilité, s'entend —, entre une matière organique fraîche ou humifiée en voie d'évolution rapide (quelques mois) et une vieille humine fort stable dont la demi-vie — pour parler le langage des physiciens atomistes — s'étend sur un bon millier d'années. Evidemment, la disponibilité pour les plantes de l'azote, du soufre ou du phosphore ne sera pas la même suivant que ces corps seront intégrés à l'une ou l'autre de ces catégories de matière organique.

Il est évidemment possible de trouver d'autres secteurs, les oligo-éléments par exemple, où cet ouvrage pêche, involontairement, faute de connaissances précises. Mais il semble que les deux types d'exemples cités plus haut, utilisation insuffisante de processus analytiques connus et insuffisance des connaissances de base, caractérisent assez bien les causes les plus habituelles des déficiences qu'un lecteur averti pourra constater dans cet exposé sur la fertilité des sols ferrallitiques.

2.2. L'EVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURE

Si l'on s'en tient à une logique rigoureuse, un traité sur la fertilité des sols ferrallitiques devrait inclure une partie importante consacrée à l'évolution des sols sous culture.

Il n'a pas paru opportun de l'adjoindre ici, d'une part, parce qu'elle alourdirait considérablement cet ouvrage en en doublant vraisemblablement le volume, et, d'autre part, parce que de nombreux points ont déjà fait l'objet de développements partiels, mais parfois importants ; c'est ainsi que les exposés sur la stabilité structurale et la porosité

incluent l'évolution de ces caractéristiques qui a lieu après toute mise en valeur agricole, que la dynamique de l'azote et celle du soufre sous culture dépendent à peu près exclusivement de celle de la matière organique assez longuement traitée ici..., etc.

Des chapitres supplémentaires sur l'évolution des sols sous cultures auraient amené de très nombreuses redites sans vraisemblablement apporter, actuellement, une vision plus précise des phénomènes étudiés.

Une autre considération a également eu un rôle dans cette omission volontaire. Si l'évolution *des sols sous cultures perennes*, hévéa, palmier à huile, caféier, cacaoyer, bananier, etc. est maintenant à peu près bien connue ainsi que les moyens de parer à « l'épuisement des sols » qui les portent, par contre, la question des modifications des *caractéristiques des sols sous cultures annuelles*, encore mal élucidée en ce qui concerne la conservation de la fertilité lors de l'intensification culturale et la suppression de la jachère, se trouve actuellement en pleine évolution à la suite d'expériences faites à peu près simultanément en de nombreuses régions du monde (principalement Côte d'Ivoire, Nigéria, Brésil, Pérou...). Non seulement il était délicat de tenter une synthèse au vu de données partielles souvent incluses dans des rapports provisoires, mais cette synthèse risquait d'être rapidement et très largement dépassée dès la publication des résultats définitifs.

2.3. LES PROCEDES CULTURAUX

Par procédés culturaux on entend ici tous les *traitements mécaniques ou manuels* que l'on peut infliger au sol, depuis la suppression de la végétation naturelle (quelque soit le moyen utilisé) jusqu'au labour en passant par les binages, sarclages, pseudo-labours...

Il ne pouvait être question d'adjoindre à cet ouvrage, déjà volumineux, un traité sur la façon de cultiver les sols ferrallitiques par tel ou tel instrument avec la manière de s'en servir.

Par contre, il semble opportun de signaler ici l'évolution des esprits en ce domaine. Après une période, jusque vers le début des années 1950, où l'on accusait la charrue d'être à l'origine de maux très graves qui affligeaient l'agriculture tropicale ou étaient susceptibles de l'affliger (« *the dangerous plough* » de certains auteurs anglo-saxons), on s'est efforcé, souvent avec de très grands succès, de réaliser un travail du sol plus profond et plus complet que celui qu'effectuaient les outils parfois primitifs du paysan et, ceci, par l'introduction de la charrue, à disques le plus souvent, avec traction mécanique ou animale.

On assista dès la deuxième moitié de la décennie soixante-dix à un retournement de cette tendance, au moins dans les milieux de la recherche agronomique : grâce à *l'emploi d'herbicides*, on tente de supprimer, si possible totalement, les façons culturales « brutales » : c'est le « *zéro tillage* » des agronomes américains qui en sont souvent les promoteurs en milieu tropical.

Par bonheur, du fait de leurs propriétés structurales — en particulier une porosité souvent bonne à excellente —, les sols ferrallitiques acceptent assez bien cette technique, tout au moins tant que leurs caractéristiques de structure ne sont pas trop éloignées de ce qu'elles étaient à l'état « naturel ».

Compte tenu du prix des herbicides et de la haute technicité requise pour leur emploi, il ne semble pas que la *culture sans travail du sol* puisse, pour l'instant, se généraliser sous les tropiques même lorsque les caractéristiques intrinsèques des sols le permettent comme c'est le cas pour les ferrallitiques. Il est très vraisemblable que l'on s'acheminera vers des solutions mixtes, comme le « preparo mínimo » (*préparation minimum du sol*) actuellement préconisé dans le sud du Brésil : lors de deux cultures successives — souvent deux cycles culturaux la même année —, la première est effectuée de façon conventionnelle avec labour, hersage, mais pour la seconde l'emploi d'herbicide permet de se contenter d'instruments de pseudo-labour utilisés avec parcimonie (par exemple coutres ameublissant la terre sur des bandes de 10 centimètres de large et 16 centimètres de profondeur pour

semer du soja dans des chaumes de blé). L'un des gros avantages de ce procédé est de réduire considérablement les risques d'érosion.

Dans cet ouvrage on a abordé, mais non traité de façon spécifique, une technique des agriculteurs des tropiques qui retrouve depuis quelques années un regain d'intérêt après avoir longtemps été délaissée et, disons le mot, quelque peu méprisée : c'est celle des *cultures associées.*

Beaucoup d'avantages s'y rattachent : utilisation maximale du sol, de ses réserves en eau et en nutriments, parasitisme moindre, couverture pratiquement assurée de la surface par les plantes en végétation ou les déchets de récoltes, protection contre l'érosion, productivité généralement supérieure à l'hectare...

Il y a évidemment un handicap grave, c'est que l'entretien des cultures doit se faire entièrement à la main (sauf exception, il n'est pas possible de mécaniser, même de la façon la plus élémentaire). En outre tous les avantages énumérés plus haut ne sont valables que s'il y a compatibilité entre les différentes espèces végétales cultivées en association. Là réside la plus importante difficulté. Les paysans locaux ont bien une longue expérience de cette technique mais, chez eux trop souvent, des questions d'opportunité occultent la tradition. Quant aux agronomes, pédologues, physiologistes du végétal — bardés de diplômes et fiers de leur savoir —, ils doivent avouer leur ignorance en ce domaine — sauf cas particuliers — et se mettre humblement à la tâche.

3. LES PROGRÈS DES CONNAISSANCES AGRONOMIQUES

3.1. EVOLUTION DES CONNAISSANCES

Lorsque pédologues et agronomes actuellement d'âge mûr se penchent sur leur passé et essaient d'évaluer la somme des connaissances acquises depuis qu'ils étaient étudiants en agronomie tropicale, ils ont une certaine difficulté à estimer de façon correcte, même s'il en furent partiellement les acteurs, non seulement l'ampleur des progrès mais la véritable révolution qui s'est produite en un peu plus de trente ans dans le « savoir » agronomique.

Dans leur jeunesse, les cours magistraux de spécialistes d'autorité mondiale faisaient alors état d'explications et d'hypothèses qu'on aurait pu croire tirées de Columelle ou d'Aristote ; c'est ainsi que les désastreux rendements des palmiers à huile de Basse Côte d'Ivoire, par rapport à ceux de Malaisie, étaient, entre 1945 et 1950, mis au compte de facteurs climatiques. Et, très peu d'années plus tard, on démontrait qu'il s'agissait d'une carence en potasse assez générale dans les sols concernés de Côte d'Ivoire.

Fort heureusement, depuis trente ans, bon nombre de mythes furent brisés et beaucoup d'explications erronées furent rectifiées, ce qui par ailleurs ne veut pas dire que tout soit parfait maintenant.

Malgré cette dernière restriction, que de progrès accomplis depuis l'époque où l'on mesurait pour la première fois de façon systématique en milieu ferrallitiques pH, azote et bases échangeables, sans d'ailleurs trop bien savoir comment interpréter les résultats analytiques obtenus !

Dès le début des années cinquante, on a établi en tatonnant, les premières échelles de fertilité (1) incluant azote, éléments échangeables et phosphore, échelles dont les bases

(1) Il y eut des précurseurs comme BAEYENS, mais son échelle de fertilité établie hâtivement vers 1948 pour les sols situés entre Kinshassa et la mer au Zaïre est difficilement utilisable pour de multiples raisons.

restent encore souvent valables. Et du même coup commençaient à apparaître des valeurs critiques précises, pour le potassium en particulier. Des échecs agronomiques retentissants étaient l'occasion de préciser les rôles du soufre, du manganèse, de l'aluminium échangeable... etc. On commençait également à affirmer que la teneur absolue d'un nutriment donné n'était pas tout, mais qu'il fallait aussi tenir compte de l'environnement (cationique et anionique).

La décennie suivante, celle des années soixante, fut surtout celle de l'application aux sols ferrallitiques de techniques découvertes ou remises à jour quelques temps auparavant : les indices de structure, les études micromorphologiques, le fractionnement du phosphore et celui de la matière organique. Progressivement s'imposait, dans l'esprit des agronomes, l'importance des proportions relatives entre éléments dit fertilisants, ce qui a été décrit dans cet ouvrage sous le nom d'*équilibres*.

Il est évident que les progrès n'ont pas cessé ensuite, peut-être plus dans le sens d'un approfondissement des connaissances, progressif mais réel, que de découvertes qui font choc. On peut citer un peu en vrac : les études sur la porosité par les méthodes classiques et par micromorphologie, les mécanismes de la rétrogradation du phosphore, des précisions sur les teneurs en soufre des sols et la dynamique de cet élément, une meilleure connaissance des teneurs en oligo-éléments compatibles avec les cultures... etc.

3.2. DIFFUSION DES CONNAISSANCES

Lorsque l'on examine d'assez près le progrès des connaissances, un aspect saute immédiatement aux yeux : c'est la lenteur de la diffusion des données acquises, même auprès des spécialistes directement concernés. Evidemment ceux-ci recevaient une information de première main, mais elle restait, ne disons pas superficielle, mais mal assimilée à la façon d'une lecture faite de façon un peu indifférente « pour se tenir au courant », mais sans prendre conscience de l'intérêt de tel ou tel détail — pas toujours perçu par l'auteur du texte — pour résoudre un problème resté en suspens quelque temps auparavant (1).

A ce point de vue, le cas de l'aluminium échangeable est particulièrement significatif : découverte au début du siècle par l'allemand VEITCH, étudiée entre les deux guerres par les américains, appliquée ensuite aux USA et en Amérique Latine, la notion d'aluminium échangeable n'a réellement imprégné qu'à partir de 1970 la mentalité des agronomes francophones œuvrant sous les tropiques, et ceci malgré les travaux de précurseurs, également francophones, en Indochine dès 1935 et en France vers 1960. Ne jetons pas de « première pierre », car à l'inverse, il apparaît que la communauté agronomique francophone a une conscience beaucoup plus aigüe de l'importance des équilibres entre nutriments dans les sols, ferrallitiques en particulier, que d'autres écoles agronomiques pourant de réputation mondiale ; certaines même les négligent totalement en apparence si l'on en juge par leurs publications.

A cette lenteur de la diffusion il faut ajouter le fait qu'une découverte, quelle qu'elle soit, n'est jamais total : ainsi vingt ans après la publication de la technique du fractionnement du phosphore du sol, on n'a pas fini d'en évaluer toutes les implications et applications, par exemple, le rôle des oxydes et des hydroxydes de fer et d'alumine et de leur degré de cristallisation.

Ainsi, pour diverses raisons, les connaissances progressent par à-coups, irrégulièrement avec des pesanteurs parfois illogiques.

Mais le bilan tel qu'on a pu le dégager dans cet ouvrage est tout de même impressionnant par son ampleur.

---

(1) On ne veut pas aborder ici le problème de la diffusion des connaissances auprès du paysan, toujours effectuée avec un retard considérable par rapport à celle qui atteint les spécialistes.

4. LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS FERRALLITIQUES ET LA MISE EN VALEUR AGRICOLE

4.1. LES CARACTERISTIQUES FAVORABLES A LA MISE EN VALEUR AGRICOLE

La texture

On a vu précédemment que l'un des caractères texturaux les plus constants dans les sols ferrallitiques est l'augmentation avec la profondeur de la teneur en éléments fins, argile surtout (1), augmentation le plus souvent progressive, sans discontinuité brutale, et que l'on interprète assez souvent ce phénomène par la théorie de l'appauvrissement.

De fait, une forte proportion de sols ferrallitiques possède des horizons de surface sablo-argileux surmontant des horizons qui deviennent progressivement argilo-sableux, voire même argileux (2). Lorsque l'appauvrissement s'exagère, le caractère sableux apparaît en surface, tandis que le reste du sol passe progressivement d'une texture sablo-argileuse à argilo-sableuse et même argileuse.

Les sols argileux dès la surface (plus de 40 % d'argile) ont, au moins sous végétation naturelle ou culture bien conduite, des taux de matières organiques tels que la trop forte compacité engendrée par l'argile est habituellement neutralisée ou du moins fortement atténuée.

Enfin, les sols sableux à la fois en surface et en profondeur, s'ils couvrent des aires relativement étendues dans certains pays (Congo, République Centrafricaine, Zaïre, etc.), ne représentent qu'une fraction assez faible des sols ferrallitiques.

Si l'on se reporte au chapitre III (tableau III.5., p. 30), on peut conclure que les caractères de texture rangent la majorité des sols ferrallitiques parmi les sols qui ont normalement de bons comportements texturaux (à l'exception des sols ferrallitiques sableux en surface et en profondeur).

La structure

Les structures des sols ferrallitiques (non dégradés par la culture) sont généralement satisfaisantes en surface grâce à l'humus et en profondeur grâce au fer, sauf si une hydromorphie temporaire en B les rend compactes (cet inconvénient est en général peu contraignant, l'horizon hydromorphe étant habituellement situé à une profondeur telle qu'il ne gène pas l'enracinement de la majorité des plantes cultivées). L'indice de stabilité de cette structure est le plus souvent excellent en surface sous végétation naturelle (Is allant de 0,15 à 0,60 en moyenne).

Par contre, la mise en culture provoque une nette péjoration des caractéristiques structurales et, en particulier, de la stabilité des agrégats.

---

(1) Cette augmentation de la teneur en argile avec la profondeur existe mais est relativement peu importante dans certaines catégories de sols ferrallitiques : c'est le cas des oxisols (Soil Taxonomy), des latossolos (classification brésilienne), au contraire des ultisols (Soil Taxonomy) et des « Solos podzolizados » (Brésil) où cette différenciation est très marquée.

(2) Cet enrichissement en argile ne se manifeste que sur une certaine profondeur. Il est fréquent en effet que l'horizon C soit moins argileux que l'horizon B.

La porosité

Elle est normalement satisfaisante (porosité globale pratiquement toujours supérieure à 40 % du volume du sol) ; elle est le plus souvent excellente sous climat humide et sous végétation naturelle. Elle a cependant, parfois, besoin d'être améliorée (cas des terres cultivées, des sols à horizon de « consistance » à faible profondeur).

L'eau utile

Le domaine de l'eau utile est en moyenne de 10 à 14 mm par tranche de sol de 10 centimètres.

Il est comparable, et souvent supérieur, à celui d'autres types de sol.

La perméabilité

Elle est élevée dans presque tous les types de sols ferrallitiques ; la culture la diminue assez fortement, tout en lui conservant des valeurs acceptables.

Toutefois le « glaçage » superficiel des sols structuralement dégradés par plusieurs années de cultures sarclées provoque un ruissellement générateur d'érosion, plus d'ailleurs du fait de la brutalité des précipitations que d'une perméabilité particulièrement déficiente.

La matière organique et l'azote

Les sols ferrallitiques sous végétation naturelle, qu'il s'agisse de savane ou de forêt, sont en général fort bien fournis en matières organiques et, partant, en azote. De telle sorte que l'alimentation azotée des cultures se trouve normalement assurée la première année (ou les premières années) qui suit la mise en valeur. Si la dégradation rapide de cette matière organique pose sous cultures sarclées des problèmes de reconstitution et de conservation pas toujours résolus, on sait par contre fort bien conserver cette matière organique dans les plantations perennes à condition qu'elles soient bien conduites (plantes de couverture...).

Le potassium

Immédiatement après défrichement, les sols ferrallitiques se montrent, sauf exception, assez bien pourvus en potassium échangeable, suffisamment en tout cas pour éviter tout ennui immédiat.

Mais comme souvent l'apport dû à la végétation naturelle, surtout forestière, est très important par rapport à ce qui préexiste dans le sol, il s'ensuit une certaine fragilité des ressources en potassium dans le cas le plus général, à tel point que l'on estime à deux ou trois ans en cultures sarclées, à une dizaine d'années en cultures pérennes avec plantes de couverture, l'intervalle de temps où il n'est pratiquement pas encore nécessaire (sauf exception) de fournir du potassium au sol.

Par contre, on sait de façon satisfaisante corriger déficiences et carences potassiques grâce à des doses d'engrais relativement modestes ou, plus économiquement encore, par une jachère de quelques années. Les valeurs des seuils de carence et de déficience, respectivement 0,10 mé/100 g et environ 0,20 mé/100 g pour les sols les plus habituels, sont bien connues.

Les oligo-éléments

Si on les compare à d'autres types de sols, qu'ils soient tempérés ou tropicaux, on s'aperçoit que les sols ferrallitiques, en moyenne, ne sont ni mieux, ni plus mal partagés que les autres au point de vue oligo-éléments.

On y constate bien sur des carences, mais pas plus qu'ailleurs. Quant aux toxicités, elles sont surtout le fait du manganèse et proviennent plus de la dynamique particulière de cet élément sous l'influence des bas pH que des teneurs excessives dans le sol. Sauf pour le bore et le manganèse, on connaît mal les quantités d'oligo-éléments du sol nécessaires aux cultures ou qui leur sont nocives.

4.2. LES CARACTERISTIQUES DEFAVORABLES A LA MISE EN VALEUR AGRICOLE

Horizons pédologiques fortement différenciés

On a vu que les discontinuités pédologiques pouvaient gêner ou empêcher la pénétration des racines. Ce sont par ordre d'importance décroissante :

— les cuirasses ou carapaces ferrugineuses qui interdisent toute culture ; là où elles affleurent en surface, elles stérilisent parfois de vastes espaces ;

— les nappes de gravats, gravillons ferrugineux ou quartzeux seuls ou en mélange ; leur présence est très fréquente en Afrique, beaucoup moins apparemment en Amérique Latine et en Extrême Orient ;

— un horizon de consistance à faible profondeur : il semble exister dans la plupart des sols ferrallitiques, mais ne paraît devenir vraiment gênant que dans les sols acides subissant des périodes sèches intenses et prolongées ;

— un horizon d'hydromorphie temporaire, le plus souvent situé à une profondeur telle qu'il n'introduit qu'une gêne relative, sauf pour les plantes à enracinement profond et craignant l'asphyxie (cacaoyers, hévéas...).

Stabilité structurale relativement fragile en surface

Cette fragilité est surtout sensible dans le cas des cultures annuelles qui laissent le sol nu pendant un certain temps ; elle est d'ailleurs plus la conséquence du climat que des propriétés propres du sol : combustion accélérée de la matière organique dans une ambiance chaude et humide, pluies très agressives qui démantèlent les agrégats superficiels et diminuent de ce fait la perméabilité, donc l'approvisionnement du sol en eau ; en outre le ruissellement superficiel s'en trouve augmenté et l'érosion facilitée.

Drainage important concentré dans le temps et bases échangeables

En raison des types de pluviosité auxquels sont soumis les sols ferrallitiques, la quantité d'eau qui percole à travers le profil est, non seulement importante, mais la majeure partie de celle-ci se trouve concentrée sur une période relativement courte à l'intérieur de la saison des pluies. L'une des conséquences, et sans doute la plus grave, en est une perte de nutriments minéraux du sol par entraînement avec les eaux de drainage. De ce fait, la dynamique des bases échangeables dans les sols ferrallitiques se trouve entièrement dominée par les phénomènes de lixiviation.

Les carences et déficiences en soufre.

Les sols ferrallitiques n'ont évidemment pas l'apanage des carences et déficiences en soufre, mais celles-ci s'y rencontrent, pour autant qu'on le sache, avec une fréquence plus importante que dans d'autres types de sols. Elles sont surtout sévères sur les défriches de savane alors que les défriches forestières en sont pratiquement indemnes. Paradoxalement elles s'atténuent au fur et à mesure que le temps de culture s'allonge à l'inverse de ce qui

se passe pour les autres nutriments. Les carences en soufre sont faciles à corriger : même les plus sévères ne résistent pas à quelques dizaines de kilogrammes de soufre à l'hectare.

Une dynamique du phosphore souvent défavorable

Il est assez rare que les sols ferrallitiques soient dépourvus de phosphore de façon dramatique, bien que cette éventualité puisse se produire, et se produise effectivement (Haute -Volta, Campo Cerrado brésilien, etc.).

Mais le plus souvent, il y a insolubilisation de la majeure partie du phosphore par les oxydes et hydroxydes de fer (et parfois aussi d'aluminium). Si on ajoute à ce phosphore « minéralement » insolubilisé celui qui est complexé à la matière organique (et donc se trouve inutilisable par la plante tant que celle-ci n'est pas décomposée), il ne reste qu'une très faible partie du phosphore total du sol qui soit directement assimilable (souvent à peine de l'ordre du vingtième de ce phosphore total).

Si l'on connaît à peu près l'ordre de grandeur du seuil critique du phosphore assimilable, si l'on sait que le phosphore rétrogradé peut devenir à nouveau assimilable, on n'a qu'une idée approximative des conditions pour lesquelles se produit cette réversibilité et surtout comment la provoquer.

Les teneurs en calcium et magnésium

A vrai dire, on n'a pu répertorier que de façon tout à fait exceptionnelle des carences en calcium dans les cultures faites en sols ferrallitiques. Par contre, celles qui font intervenir le magnésium sont plus fréquentes, et on a d'ailleurs déterminé un seuil critique de magnésium échangeable (de l'ordre de 0,40 milliéquivalent pour 100 grammes de sol). En fait, les désordres physiologiques dans lesquels le magnésium est impliqué proviennent plus souvent de déséquilibres avec le potassium ou le calcium échangeable que d'insuffisances ou d'excès absolus dans le sol.

Jusque là, on n'a parlé que des besoins des plantes en calcium et magnésium, mais le véritable problème se trouve dans le rôle que ces deux éléments tiennent dans le sol, en particulier pour assurer au complexe absorbant des propriétés convenables, lesquelles conditionnent, pour une grande part, la fertilité dite chimique des sols ferrallitiques ou non. Malheureusement on peut considérer, pour fixer les idées, qu'environ les deux tiers ou les trois quarts des sols ferrallitiques de la planète sont fortement désaturés en bases ($V < 20$ %) et que seulement un faible pourcentage — probablement de l'ordre de 10 à 15 % — possède un taux de saturation supérieur à 40 — 50 % (horizon B) ; en outre, la permanence de ce calcium et de ce magnésium sur le complexe absorbant se trouve compromise dès qu'il y a mise en valeur agricole. On arrive relativement bien à parer à cette fragilité avec des cultures pérennes arbustives et arborées, ainsi qu'avec la canne à sucre, mais le problème revêt toute sa gravité en ce qui concerne les cultures annuelles sarclées.

En résumé, on peut dire qu'à la surface du globe, les sols ferrallitiques sont en majorité désaturés et acides et qu'ils présentent un risque supplémentaire de désaturation et d'acification dès qu'il y a culture.

Le remède, bien sûr, est connu : il consiste à apporter des amendements calciques et calco-magnésiens. Malheureusement les tonnages nécessaires rendent cette opération coûteuse, et cela d'autant plus que les gisements de calcaire ou de dolomie sont plus éloignés du lieu d'application.

Le pH du sol et les toxicités aluminiques et manganiques

Le pH du sol est bien évidemment un reflet de l'état de désaturation du complexe absorbant. En lui-même, il ne constitue pas une contrainte absolue, même lorsqu'il atteint des valeurs basses, mais il est un indicateur très précieux des risques de toxicités engendrées

par l'aluminium échangeable et le manganèse assimilable, éléments qui ont la propriété d'apparaître sous ces formes en quantités appréciables dès pH 5,0-5,2 et surtout à des valeurs de pH inférieures à celles-ci.

Les toxicités aluminiques, en particulier, représentent un très grave handicap pour l'agriculture dans de très nombreux sols ferrallitiques d'Amérique latine, d'Afrique (principalement au sud de l'équateur), de Madagascar et d'Extrême-Orient.

On a vu, d'autre part, que des successions de cultures dans des sols originellement peu acides ont normalement pour conséquence une acidification progressive, donc des risques, lorsque le pH atteint les valeurs citées plus haut, de voir apparaître l'aluminium échangeable à doses nocives dans des sols qui, au départ, n'en possédaient pas ou peu. Il peut en être de même en ce qui concerne le manganèse bivalent dans les sols riches en maganèse total.

5. HIÉRARCHISATION DES DIVERS FACTEURS DE LA FERTILITÉ DES SOLS FERRALLITIQUES

Lorsqu'on essaie d'évaluer pour un ou plusieurs types de sols l'importance des divers facteurs de fertilité (ou des contraintes agronomiques) les uns par rapport aux autres, il est tentant de leur affecter un « poids » relatif que l'on traduit assez souvent par une note chiffrée ou un pourcentage par rapport à un potentiel considéré comme maximal.

Traditionnellement, on fait la différence entre les contraintes d'ordre physique, profondeur du sol utile, texture, structure, risque d'érosion et pente, capacité pour l'eau, régime hydrique... et les contraintes d'ordre chimique concernant les principaux nutriments biogènes, azote, phosphore, soufre, potassium, calcium, magnésium et parfois certains oligo-éléments (cuivre, zinc, molybdène, bore), auxquelles on ajoutera les contraintes résultant de la toxicité, en certaines conditions, de quelques éléments comme l'aluminium et le manganèse (on néglige ici celle dues au sodium en raison des teneurs très faibles de ce métal dans les sols ferrallitiques).

Les prospecteurs et agronomes qui se préoccupent d'évaluer le potentiel de fertilité des sols ou, ce qui revient au même, les contraintes ou limitations agricoles qui les affligent, ont l'habitude de placer au premier rang de leurs préoccupations les contraintes physiques, profondeur de sol, pente, texture et teneur en éléments grossiers, propriétés hydriques et dans une certaine mesure la structure, reléguant assez loin dans leurs préoccupations les contraintes chimiques. Ils considèrent en effet qu'il n'est pas possible de modifier les premières sans effectuer des travaux extrêmement coûteux, impensables économiquement, sauf cas particulier, alors que quelques sacs d'engrais viennent facilement à bout des secondes. C'est une attitude à peu près générale pour les sols tempérés et méditerranéens : ainsi, dans une carte des potentialités agricoles des terres du département de l'Oise au nord de Paris, seules deux données « chimiques » sont prises en compte, la capacité d'échange de bases et le pH, affectées respectivement de 80 et 20 points, soit 100 au total, ce qui est peu par rapport aux 800 points dont sont gratifiés les facteurs physiques.

Les perspectives changent dès que l'on se préoccupe de la fertilité des sols ferrallitiques. On a commencé d'abord par voir apparaître une catégorie de sols « chimiquement très pauvres », et cette contrainte figurait en bonne place parmi les facteurs limitants. Plus récemment les agronomes brésiliens, confrontés avec tous les ennuis consécutifs à l'extrême acidité de beaucoup de leurs sols (et il s'agit bien souvent de sols ferrallitiques), ont placé certaines considérations d'ordre chimique — saturation en bases, aluminium échangeable, pH (données d'ailleurs liées entre elles) — au premier plan des facteurs qui

conditionnent la fertilité des sols, au même rang pratiquement que certaines contraintes physiques parmi les plus importantes (profondeur du sol, pente, texture...). Il est évident que ce classement « privilégié » reflète l'importance que revêt l'aluminium échangeable pour l'agriculture de ce pays et... aussi le coût que représentent les tonnages d'amendements susceptibles de corriger ce défaut.

Quant aux autres facteurs (ou contraintes) chimiques, potassium et magnésium échangeables, phosphore, soufre, azote, oligo-éléments, il est évidemment toujours possible de corriger par des apports minéraux relativement modestes une éventuelle déficience ou même une carence ; mais il ne faut pas oublier qu'à part certaines cultures de rente (en fait les cultures pérennes, y compris l'ananas et la canne à sucre), les spéculations agricoles les plus habituelles en sols ferrallitiques sont des cultures vivrières «pauvres » et que l'achat de quelques sacs d'engrais représente souvent une dépense insurmontable pour le paysan.

Il semble maintenant opportun d'essayer de mettre un peu d'ordre dans ce qui précède en classant ces facteurs ou contraintes ou limitations comme on voudra les dénommer.

Tout d'abord les facteurs climatiques sont habituellement mis hors catégorie, de telle sorte que l'on classe souvent ainsi les contraintes propres aux sols ferrallitiques en deux catégories, comme suit :

Contraintes d'importance majeure

Profondeur du sol
Pente
Charge en éléments grossiers (gravillons dans tous les cas, pierres et blocs s'il y a mécanisation, même sommaire).
Régime hydrique (surtout s'il est caractérisé par une hydromorphie subsuperficielle, ou un écoulement exclusivement oblique de l'eau de drainage).
Aluminium échangeable ou pH ou désaturation du complexe absorbant.

Contraintes d'importance moyenne

Texture
Structure
Eau utile, perméabilité
Matière organique ou azote total
Teneurs en bases échangeables Ca, Mg, K
Teneurs en soufre et en phosphore
Oligo-éléments

Il doit être entendu que la deuxième catégorie comprend à la fois des facteurs qui ne sont pratiquement jamais des limitations absolues à la culture (texture-structure-matière organique) bien qu'ils puissent handicaper sérieusement les rendements, et d'autres qui peuvent l'être (carence en potassium par exemple), mais sont relativement faciles à corriger.

Il est évidemment très difficile de porter un jugement d'ensemble sur les possibilités agricoles des sols ferrallitiques étant donné leur diversité... En généralisant à l'extrême, on peut dire que leurs propriétés physiques sont le plus souvent satisfaisantes pour une mise en valeur agricole. Par contre, il faut prêter une extrême attention aux caractéristiques chimiques afin de déceler d'éventuelles carences ou déficiences, ou encore des toxicités, qu'elles soient propres au sol ou induites par des cultures successives.

BIBLIOGRAPHIE

ABRUNA-RODRIGUEZ (F.), VICENTE-CHANDLER (J.), 1967. — « Sugar cane yields as related to acidity of Humid Tropic Ultisol ». *Agron. Journal,* 59, 4 : 330-331.

ABRUNA-RODRIGUEZ (F.), VICENTE-CHANDLER (J.), PEARSON (R.W.), SILVA (S.), 1970. — Crop response to soil acidity factors in ultisols and oxisols. I. Tobacco. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* 34, 4 : 629-635.

ACQUAYE (D.K.), 1973. — Factors determining the potassium supplying power of soils of Ghana. C.R. 10th Colloque Inst. Intern. Potasse, Abidjan - Le Potassium dans les cultures et les sols tropicaux : 51-69.

ACQUAYE (D.K.), CUNNINGHAM (R.K.), 1965. — Losses of nitrogen by ammonia volatilization from surface-fertilized tropical forest soils. *Trop. Agric.* (Trin), 42, 4 : 281-292.

ACQUAYE (D.K.), MACLEAN (A.J.), RICE (H.M.), 1967. — Potential and capacity of potassium in some representative soils of Ghana. *Soil Sci.,* 103, 2 : 79-89.

ACQUAYE (D.K.), SMITH (R.W.), LOCKARD (R.G.), 1965. — Potassium deficiency in unshaded Amazon cacao (Theobroma cacao L.J.) in Ghana. *J. Hort. Sci.,* 40 : 100-108.

ADAMS (F.), 1966. — Calcium deficiency as a causal agent of ammonium phosphate injury to cotton seedlings. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* 30, 4 : 485-488.

ADAMS (F.), EVANS (C.E.), 1962. — A rapid method for measuring lime requirements of red yellow podzolic soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* 26 : 355-357.

ADAMS (F.), PEARSON (R.W.), 1967. — Crop response to lime in the Southern United States and Puerto Rico, in PEARSON R.W. et ADAMS F., « Soil Acidity and Liming », *Agronomy,* 12 : 161-206.

ADDISCOTT (T.M.), 1969. — A method for measuring the phosphate potential of a Tanzanian soil. *East Afric. Agric. and For. J.,* 35, 1 : 21-27.

ADDISCOTT (T.M.), TALIBUDEEN (O.), 1969. — The buffering capacity of potassium reserves in soils, *Potash review,* Section 4, 45, nov.

ADUAYI (E.A.), 1972. — Effect of cuprous oxide (copper) on the growth and mineral composition of coffee seedlings grown in nutrient solution. *East Afric. Agric. and For J.,* 37, 3 : 185-191.

AGBOOLA (A.A.), COREY (R.B.), 1973. — The relationship between soil, pH, organic matter, available phosphorus, exchangeable potassium, calcium, magnesium and nine elements in the maize tissue. *Soil Sci.,* 115, 5 : 367-375.

AHENKORAH (Y.5, 1970. — Potassium supplying power of some soils of Ghana cropped to cacao. *Soil Sci.,* 109, 2 : 127-135.

AHMAD (N.), 1967. — Seasonal changes and availability of Phosphorus in swamp-rice Soils of North Trinidad. *Trop. Agric.,* (Trin), 44, 1 : 21-32.

AHMAD (N.), DAVIS (C.E.), 1970. — Forms of K fertilizers and soil moisture content on potassium status of a Trinidad soil *Soil Sci., 109,* 2 : 121-126.

AHMAD (N.), TULLOCH-REID, DAVIS (C.E.5, 1969. — Fertilizer Studies on Pangola Grass (Digitaria decumbens Stent.) in Trinidad, Description of the experiments and effect of Nitrogen. *Trop. Agric.* (Trin), 46, 3 : 179-178.

AKEHURST (B.C.), SREEDHARAM (A.), 1965. — Time of planting - A brief review of experimental work in Tanganika 1956-1962. *E. Afr. Agric. For J.,* 30 : 181-201.

ALLISON (F.E.), 1968. — Soil aggregation - some facts and fallacies seen by a microbiologist. *Soil Sci.,* 106 : 136-143.

ALMEIDA (J.X. de), BRASIL (M.O.C. do), 1977. — Fixacão de fósforo em tres solos sob cerrado de Goias. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 1, 1 : 12-15.

AMER (F.), BOULDIN (D.R.), BLACK (C.A.), DUKE (F.R.), 1955. — Characterisation of soil phosphorus by anion exchange resin adorption and P 32 equilibration. *Plant and soil*, 6 : 391-408.

AMON (B.O.E.), 1965. — The response by crops in a rotation to nitrogen phosphorus and potassium in the savannah zone of Western Nigeria. - Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility. Khartoum, O.A.U./S.T.R.C. Publ. N° 98 : 339-348 (London).

ANAND REDDY (K.), BHASKER REDDY (B.), BALASWAMY (H.), VENKATACHARI (S.), 1978. — Effects of soil moisture and organic mulches on corn planted on different patterns, *Expl. Agric.*, 14, 4 : 389-394.

ANDERSON (A.J.), 1948. — Molybdenum and other fertilizers in pasture development in the S. Tablelands of N.S. Wales. *J. Australian Inst. Agr. Sci.*, 14 : 28-33.

ANDERSON (G.D.), 1965. — The influence of the years under cultivation and ley on the chemical and physical characteristics of some wheat soils in Northern Tanzania. Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility, Khartoum, O.A.U./S.T.R.C. Publ. No 98 : 86-95. (London).

ANDERSON (G.D.), 1966. — The effects of gypsum application on water infiltration and their relevance to land reclamation on Kalimawe irrigation scheme, Tanzania, *East Afric. Agric. and For J*, 31, 4 : 424-438.

ANDRADE (V.M.M.), 1973. — Influencia do cobre no crescimento, morfologia e anatomia da folha e na composiçao mineral do cafeiero (Coffea arabica L.), variedades Mundó Novo e Catuai. Tese de Doutoramento, (Cité par Malavolta (1976), p. 44).

ANDREW (R.L.), 1942. — Reversion of Ca superphosphate by serpentine. *New Zeal. Jour. Sci. and Technol.*, 23 B : 208-209.

ANDREW (C.S.), VANDENBERG (P.J.), 1973. — The influence of aluminium on phosphate adsorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes, *Aust. J. Agric. Res.*, 24 : 341-351.

ANDREWS (D.J.), 1972. — Intercropping with sorghum in Nigeria, Expr. Agric., (Trin.), 8, 2 : 139-150.

ASKEW (H.O.), 1942. — The course of the reactions occuring between serpentine and superphosphate. *New Zeal. Jour. Sci. and Technol.*, 24 B : 128-134:

ASLYNG (H.C.), 1954. — The lime and phosphate potentials of soils. The solubility and availability of phosphates. Yearbook Royal Vet. Agr. Coll. (Copenhagen) : 1 - 50 - Cité par Roche et *al.* (1978).

ASLYNG (H.C.), 1964. — Phosphate potential and phosphate status of soils. *Acta Agric. Scand.*, 14 : 261-285. Cité par Roche et *al.* (1978).

ASSA (A.D.), 1976. — Phénomène de sélectivité d'échange cationique dans certains minéraux argileux - 2 Les sites d'absorption du potassium. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XIV, 4 : 279-286.

ASSELINE (J.), VALENTIN (C.), 1977. — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. ORSTOM, Adiopodoumé (Côte d'Ivoire), miméo, 34 p.

ATTOE (O.J.), 1946. — Potassium fixation and release in soils occuring under moist and drying conditions, *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 11 : 145-149.

ATTOE (O.J.), 1948. — Fixation and recovery by oats of potassium applied to soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 13 : 112-115.

ATTOE (O.J.), OLSON (R.A.), 1966. — Factors affecting rate of oxidation in soils of elemental sulfur and that added in rock phosphate - sulfur fusions. *Soil Sci.*, 101, 4 : 317-325.

AUBERT (G.), 1958. — *In* compte rendu des discussions. Potassium Symposium Intern. Potash. Inst. (Bern.) : 351-353.

AUBERT (G.), 1967. — *In* Rapport de synthèse du groupe d'étude II-2, compte rendu des débats. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., II : 1263-1265.

AUBERT (G.), HENIN (S.), 1945. — Relations entre le drainage, la température et l'évolution des sols. *C.R. Acad. Sci.* (Paris), 220 : 330-332.

AUBERT (H.), PINTA (M.), 1971. — Les éléments traces dans les sols, ORSTOM, Travaux et Documents, n° 11, 104 p., 98 tabl.

AUDRY (P.), 1967. — Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture (arachide et penicillaire). Coll. sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, 19-25 nov., 2 : 1591-1614.

AYLMORE (L.A.G.), KARIM (M.), QUIRK (J.P.), 1967. — Adsorption and desorption of sulfate ions by soils constituants. *Soil. Sci.*, 106, 1 : 10-15.

AYRES (A.S.), HAGIBARA (H.H.), 1953. — Effect of the anion on the sorption of potassium by some humic and hydrol-humic latosol. *Soil. Sci.*, 75 : 1-17.

BACHE (B.W.), SHARP (G.S.), 1976. — Caracterization of mobile aluminium in acid soils. *Geoderma*, 15, 2 : 91-101.

BARBIER (G.), 1962. — La dynamique du potassium dans le sol. Potassium Symposium, Intern. Potash. Inst., Bern. : 231-258.

BARLET (A.), DIDIER et SAINT-AMAND (R.), CROZAT (G.), DOMERGUE (J.L.), 1976. — Importance agronomique des apports en potassium via l'atmosphère sur des sols de zones de savane. *Agron. Trop.*, XXXI, 1 : 47-49.

BARROW (N.J.), 1972. — Influence of solution concentration of calcium on the adsorption of phosphate, sulfate and molybdate by soils. *Soil Sci.*, 113, 3 : 175-180.

BARTHOLOMEW (W.V.), 1972. — Soil nitrogen and organic matter, in « Soils of the Humid tropics », p. 63-81. Pub. Nat. Acad. of Sciences, Washington DC, 217 p.

BARTHOLOMEW (W.V.), DON KIRKHAM, 1960. — Mathematical descriptions and interpretations of culture indiced soil nitrogen changes. 7th Int. Cong. Soil. Sci., 2 : 471-477 (Madison).

BARTHOLOMEW (M.W.), MEYER (I.), LAUDELOUT (H.), 1953. — Mineral nutrient immobilization under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgium Congo) region. Publ. INEAC (Bruxelles), Série Sci., 57 : 27 p.

BATES (J.A.R.), 1960. — Studies in Nigerian forest soil I, the distribution of organic matter in the profile and in various soil fractions. *Journal of Soil Science*, 11, 2 : 246-256.

BATES (J.A.R.), BAKER (T.C.N.), 1960. — Studies on a Nigeria forest soil. Part II, Distribution of phosphorus in the profile and various soil fractions. *J. Soil Science*, II, 2 : 257-265.

BAVER (L.D.), 1972. — Physical properties of soils. *In* Soils of the humid tropics, p. 50-62. National Academy of Science (Washington) édit.

BEAR (F.E.), TOTH (S.J.), 1948. — Influence of calcium on the availability of other cations. *Soil Sci.*, 65 : 69-74.

BEATON (J.D.), 1966. — Sulfur requirements of cereals, tree fruits, vegetables and other crops. *Soil Science*, 101, 4 : 267-282.

BECKETT (P.H.T.), 1964. — Potassium calcium exchange equilibria in soils : specific absorption sites for potassium. *Soil Science*, 97, 6 : 376-386.

BECKETT (P.H.T.), 1964. — Studies on soil potassium. I : confirmation of the rates law. II : the immediate Q/I relation of labile potassium on the soil. *J. Soil Sci.*, 15, 1 : 1-23.

BECKETT (P.H.T.), 1970. — Fixed potassium and the residual effects of potassium fertilizers. *Potash review* (Bern), Subject 16, 52.

BEIRNAERT (A.), 1941. — La technique culturale sous l'Equateur. Influence de la culture sur les réserves en humus et en azote des terres équatoriales. INEAC, Serv. Tech. N° 36 (Bruxelles), 86 p.

BELLIS (E.), 1970. — Intensification of plantation rubber production of Hevea brasiliensis. C.R. congrès Institut International de la potasse sur le rôle de la fertilisation dans l'intensification de la production agricole, Antibes (France), 15-18 septembre.

BENAC (R.), 1965. — Etude des besoins en éléments majeurs du caféier Arabica en pays Bamoun, Cameroun. *Café Cacao Thé* (Paris), IX, 1 : 3-23.

BENAC (R.), 1969. — Evolution annuelle de l'azote total, nitrique et ammoniacal d'échantillons de sol, de feuilles et de fruits du caféier Arabica. *Café Cacao Thé*, XIII, 2 : 116-130.

BENNEMA (J.), JONGERIUS (A.), LEMOS (R.C.), 1970. — Micromorphology of some oxic and argillic horizons in South Brazil in relation to weathering sequences. *Geoderma*, 4 : 333-355.

BERGER (J.M.), 1964. — Interprétation des résultats des analyses des échantillons de terre pour le centre de la Côte d'Ivoire. Rapp. Ministère Agriculture, Bouaké (Côte d'Ivoire). 25 p. multigr. Inédit.

BERGER (J.M.), 1964. — Profils culturaux dans le centre de la Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, I : 41-69.

BERNHARD (F.), 1969. — Rapport d'activité ORSTOM, Adiopodoumé (Abidjan). Miméo, 22 p.

BERNHARD-REVERSAT (F.), 1973. — Le cycle du potassium en forêt tropicale humide. C.R. du X[e] colloque de l'Institut International de la Potasse, Abidjan. Le potassium dans les cultures et les sols tropicaux : 321-327.

BERNHARD-REVERSAT (F.), 1976. — Essai de comparaison des cycles d'éléments minéraux dans les plantations de Framiré (Terminalia ivorensis), et en forêt naturelle de Côte d'Ivoire. — *Bois et Forêts des Tropiques*, 167 : 25-38.

BETTANY (J.R.), STEWAT (J.W.B.), HALSTEAD (E.H.), 1973. — Sulfur fractions and carbon, nitrogen, and sulfur relationships in grass land, forest and associated transitional soils. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 37, 6 : 915-918.

BHANGOO (M.S.), KARON (M.L.), 1962. — Investigations on the giant cavendish Banana. II : Effect of Minor elements and Dolomitic Lime on fruit yield. *Trop. Agric.* (Trin.), 39, 3 : 203-210.

BHAT (K.K.S.), BOUYER (S.), 1968. — Influence de la matière organique sur le phosphore isotopiquement diluable dans quelques types de sols tropicaux. *In* « Isotopes and radiation in soil organic matter Studies », IAEA (Vienne) : 299-313.

BHAT (K.K.S.), TRUONG (B.), BOUYER (S.), 1970. — Détermination de la valeur L d'un sol ferrallitique ; action de la chaux. — *In* « Peaceful uses of atomic energy in Africa », IAEA, Vienne.

BINGHAM (F.T.), MARTIN (J.P.), CHASTAIN (J.A.), 1958. — Effects of phosphorus fertilization of California soils on minor element nutrition of citrus. *Soil Sci.*, 86, 1 : 24-31.

BINNIE (R.R.), BARBER (S.A.), 1964. — Contrasting release characteristics of potassium in alluvial and associated upland soils of Indiana. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 3 : 387—390.

BIRCH (H.F.), 1952. — The relationship between phosphate response and base saturation in acid soils. —*J. Agric. Sci.*, 42 : 276-285.

BIRCH (H.F.), 1953 a. — Phosphate response, base saturation and silica relationship in acid soils. *J. Agric. Sci.*, 43 : 230-235.

BIRCH (H.F.), 1953 b. — The relationship in acid soils between base saturation and phosphorus uptake by grasses. *J. Agric. Sci.*, 43 : 329-333.

BIRCH (H.F.), 1953 c. — The relationships between phosphate response and base saturation, pH and silica content of acid soils. Proc. conf. on crop Resp. to ferts and man. EAAFRO, 2-3 Fev., p. 10.

BIRCH (H.F.), 1958. — The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and soil.* 10, 1 : 9-31.

BIRCH (W.R.), 1959 a. — High altitude ley agronomy in Kenya. II : The effects of phosphate and nitrogen. *East Afric. Agric. J.*, 25, 2 : 113-120.

BIRCH (W.R.), 1959 b. — High altitude ley agronomy in Kenya III. The effects of nitrogen and phosphorus. *East Afric. Agric. J.*, 25, 2 : 113-120.

BIRCH (W.R.), 1960. — High altitude ley agronomy in Kenya. III : The effects of lime and molybdenium and some observations on the use of legumes. *East Afric. Agric. and for J.*, 25, 3 : 156-164.

BIROT (Y.), 1967. — L'effet de la carence en bore sur l'eucalyptus. Station de Dinderesso (Bobo-Dioulasso). Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., I : 1019-1023.

BISHOP (R.F.), COOK (R.L.), 1958. — Laboratory and greenhouse studies on effect of lime and other amendments on water soluble boron in soils. — *Canad. J. Soil Sci.*, 38, 1 : 27-35.

BITTENCOURT (V.C.), BATISTA (L.F.), GURGEL (M.N.), CORDEIRO (D.A.), 1978. — Determinação do enxofre trocavel no solo pelo método colorimétrico do azul de metiltimol. R. Bras. Ci. Solo, 2, 3 : 184-189.

BLACK (C.A.), 1968. — « Potassium ». Chapitre 9 in « Soil Plant Relationship », Wiley and sons édit. (New York).

BLACK (C.A.), EVANS (D.D.), WHITE (J.L.), ENSMINGER (L.E.), CLARK (F.E.), 1965. — Methods of soil analysis. I - physical and mineralogical properties : p. 499-519. Amer. Soc. of Agronomy (Madison) Edit.

BLANCANEAUX (Ph.), 1970. — Notice explicative de la feuille au 1/50.000, St Jean N.E., Guyane française. Rap. ORSTOM, multi, 2 volumes : 100 p. 1 carte.

BLANCANEAUX (Ph.), 1973. — Note de pédologie guyanaise. Les DJOUGOUNGPETE du bassin versant expérimental de la crique Grégoire (Sinamary - Guyane française). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, XI, 1 : 29-42.

BLANCANEAUX (Ph.), 1974. — Caractéristiques physico-chimiques des sols ferrallitiques du bouclier guyanais ; leurs relations avec les eaux de drainage et de ruissellement. Rapport ORSTOM, multi, 24 p.

BLANCHET (R.), 1959. — Pouvoir absorbant de divers constituants du sol à l'égard des ions phosphoriques et examen des réserves des terres. C.R. Acad. Agric., 45 : 247-252.

BLANCHET (R.), 1959. — Energie d'absorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes. *Ann. agron.*, 10, n° 1 : 5-53 ; n° 2 : 125-149 ; n° 3 : 267-307.

BLANCHET (M.L.), MALAPRADE (L.), 1967. — Méthode rapide de dosage des principaux éléments d'une roche silicatée. *Chim. Anal.*, 49, 1 : 11-27.

BLANCHET (R.), PERIGAUD (S.), NADEAU (J.C.), 1960. — Acidité d'échange et aluminium libre ou échangeable des sols. *Ann. Agron.*, VI : 621-649.

BLIC (Ph. de), 1975. — Comportement des sols après mise en culture mécanisée (Région centre Côte d'Ivoire). ORSTOM - Adiopodoumé (Côte d'Ivoire), Doc. ronéo 45 p.

BLIC (Ph. de), 1976. — Le comportement de sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire après défrichements et mise en culture mécanisée : rôle des traits hérités du milieu. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, XIV, 2 : 113-130.

BLONDEL (D.), 1967 a. — Premiers résultats sur la dynamique de l'Azote minéral de deux sols du Sénégal. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. : 430-499.

BLONDEL (D.), 1967 b. — Importance réelle des pertes par volatilisation de l'amoniaque en sol sableux (Dior). Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. : 500-508.

BLONDEL (D.), 1971 a. — Evolution de l'azote minéral en sol ferrugineux tropical sous culture de mil (Pennisetum typhoides). Séminaire CSTR/OUS sur les facteurs du milieu qui influencent le rendement des cultures céréalières en Afrique Tropicale, Dakar, 26-29 juillet.

BLONDEL (D.), 1971 b. — « Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (Dior) au Sénégal ». « Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à Sefa (Sénégal) », « Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol ferrugineux tropical à Nioro du Rip (Sénégal) ». *Agron. trop.* XXVI, 12 : 1303-1333, 1334-1353, 1354-1361.

BOISSEZON (P. de), 1967. — Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari. I - Etude pédologique de la vallée du Niari. ORSTOM (Paris) édit. ; 188 p.

BOISSEZON (P. de), 1973. — « La matière organique des sols ferrallitiques », *in* Les sols ferrallitiques, tome IV, La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques, p. 9-66. ORSTOM (Paris), Série Initiation - Documentation technique.

BOISSEZON (P. de), BONZON (B.), TALINEAU (J.C.), 1969. — Profils culturaux sous ananas dans la plantation de la SALCI à Ono. — ORSTOM, Abidjan, miméo, 14 p.

BOISSEZON (P. de), GRAS (F.), 1970. — Notice explicative n° 44. Carte pédologique Sibiti-Est (Rép. du Congo-Brazzaville) au 1/500.000. Centre ORSTOM, Brazzaville, 1 vol. 144 p. (carte en couleur).

BOLLES-JONES (E.W.), 1954. — The interelationships of magnesium, potassium and phosphorus and their effect on the growth and composition of Hevea brasilienis. 5e Cong. Intern. Science du sol (Léopoldville), III : 176-181.

BOLLES-JONES (C.E.), 1955. — The effect of varied nutrient levels on the concentration and distribution of manganese within potato plants. *Plant and Soil,* 11,6 6 : 45-60.

BOLLES-JONES (E.W.), 1957 a. — Copper : its effects on the growth and composition of the rubber plant « Hevea Brasilenis ». *Plant and soil*, 9, 2 : 160-178.

BOLLE-JONES (E.W.), 1957 b. — A Magnesium-manganese inter-relationship in the mineral nutrition of hevea brasiliensis. *J. Rubb. Res. Inst. Malaya,* 15 : 22-28.

BOLTON (J.), 1968. — Leaching of Fertilisers applied to a latosols in lysimeters. *j. Rubb. Res. Inst. Malaya,* 20, 5 : 274-284.

BOLTON (J.), SHORROCKS (V.M.), 1961. — The effects of magnesium, limestone and other fertilizers on a mature planting of Hevea brasiliensis. *J. Rubb. Res. Inst. Malaya,* 17 : 31-39.

BONDORFF (K.A.), 1952. — Studies on the phosphoric acid content of soil. VI solubility of soil. VII solubility of soil phosphorus in dilute sulphuric acid. *Tidsskr. Planteavl,* 55 : 185-210.

BONIFACE (M.), 1959. — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Thèse doct. Univers. Strasbourg. *Mem Serv. Carte géol. Als. Lorr.* 17 : 159 p.

BONNIER (C.), SEEGER (J.), 1958. — Symbiose rhizobium - Légumineuses en région équatoriale, 2e communication. Pub. INEAC, série scientifique, n° 76 : 66 p.

BONTE (E.), 1967. — La culture du théier au Burundi. *Annales de Gembloux,* 73, 2 : 105-111

BORGET (M.), DEUSS (J.), FORESTIER (J.), 1963. — Quelques résultats des essais d'engrais sur Coffea Robusta au Centre de Recherches de Boukoko (République Centrafricaine). *Café, Cacao, Thé,* VII, I : 22-32.

BOUCHARD (L.), 1967. — Etude de l'évolution des sols sous cultures en liaison avec les études de régénération de la fertilité, Coll. Fertilité Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. : 1518-1529.

BOUCHARD (L.), DAMOUR (M.), 1971. — Contribution à l'étude des facteurs physiques des sols en vue de la culture du palmier à huile sur la côte Est malgache. *Agron. Trop.,* XXVI, 2 : 256-265.

BOUCHY (C.), 1969. — Données climatiques et évapotranspiration dans la région de Bouaké, *Cot. Fibr. Trop.,* 24, 2 : 219-242.

BOUCHY (C.), 1970. — Contribution à l'étude des déficiences minérales en culture cotonnière en Côte d'Ivoire, *Cot. et fibr. trop.* (Paris), 25, 2 : 235-251.

BOUCHY (C.), 1973. — Essai de fertilisation organo-minérale. Résultats après dix années de culture continue Maïs-Cotonnier en Côte d'Ivoire. *Cot. Fibr. Trop.* (Paris), 28, 3 : 343-364.

BOULET (R.), 1978. — Existence de systèmes à forte différenciation latérale en milieu ferrallitique guyanais : un nouvel exemple de couvertures pédologiques en déséquilibre. *Science du sol,* 2 : 75-82.

BOULET (R.), BRUGIERE (J.M.), HUMBEL (F.X.), 1979. — Relations entre caractères hydro-dynamiques et organisation des systèmes de sols en Guyane française septentrionale. Rôle de la tectonique dans l'évolution de la couverture pédologique. Conséquences agronomiques. *Science du sol,* 1 : 3-18.

BOULVERT (Y.), 1969. — Notice explicative: Carte pédologique de l'Ouham, Batangafo-Moussafoyo (R.C.A.). En cinq feuilles à 1/100.000. ORSTOM, 85 p., miméo.

BOURGEAT (F.), AUBERT (G.), 1971. — Les sols ferrallitiques à Madagascar. ORSTOM, Centre de Tananarive, 31 p., Multigr.

BOURGEAT (F.), HUYNH VAN NHAN, VALLERIE (M.), ZEBROWSKI (C.), 1973. — Relations entre le relief, les types de sols et leurs aptitudes culturales sur les hautes terres malgaches. *C.R. Acad. Agric. F.* (Paris), 59, 10 : 773-780.

BOURRIER (J.), 1965. — La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode de Vergière. Bull. Tech. du Génie Rural, n° 73, 96 p.

BOUTEYRE (G.), LEPOUTRE (B.), 1959. — Premiers résultats sur l'étude de l'évolution des sols jeunes sur argiles récentes et argiles à nodules calcaires du Logone. Troisième conférence interafricaine des sols (Dalaba), II : 899-907.

BOUYER (S.), 1976 a. — L'interaction Azote Phosphore dans les recherches sur la fertilisation des sols tropicaux. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., I : 397-410.

BOUYER (S.), 1967 b. — Compte rendu des débats du groupe II-I. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 Nov., I : 461.

BOUYER (S.), 1971. — Etudes sur la fertilisation phosphatée des sols en Afrique Tropicale et à Madagascar. *Phosphore et Agriculture* (Paris), Juin, Bull. Doc. N° 57 : I-II.

BOUYER (S.), DABIN (B.), 1963. — Etudes pédologiques du delta central du Niger. *Agro Trop.*, XVIII, 12 : 1300-1306.

BOUYER (S.), DAMOUR (M.), 1964. — Les formes du phosphore dans quelques types de sols tropicaux, 8e congr. Inter. Sci. du sol (Bucarest), IV, 60 : 551-561.

BOWDEN (J.), 1961. — Responses of cacao to copper sprays in Ghana. *Trop. Agric.* (Trin.), 38, 4 : 325-331.

BOYE (P.), 1962. — Nutrition minérale et carence potassique du palmier à huile. Conférence des Nations-Unies sur l'application de la science et de la technique dans l'intérêt des régions peu développées, 5 Nov., C. 3-1.

BOYER (Ja.), 1964. — Influence de la couverture du sol sur le bilan hydrique d'une jeune plantation de caféiers en Côte d'Ivoire. *Café Cacao Thé* (Paris), VIII, I : 22-31.

BOYER (Ja.), 1973. — Cycles de la matière organique et des éléments minéraux dans une cacaoyère camerounaise, *Café, cacao, thé* (Paris), 17, 1 : 3-24.

BOYER (J.), 1956. — Quelques critères dans le choix d'un sol à Sisal en Oubangui-Chari. Afrique Equatoriale Française. 6e Congrès International de la Science du Sol, Paris, IV, 51 : 347-351.

BOYER (J.), 1970. — Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique tropicale francophone. Committee on tropical soils. London 8-12 June. 175 p., miméo.

BOYER (J.), 1971. — Conception et réalisation des cartes d'utilisation des sols par les pédologues d'expression française. FAO-ORSTOM, oct., 67 p. miméo.

BOYER (J.), 1972. — Soil Potassium, *in* Soils of the humid tropics : 102-135. National Academy of Science édit. (Washington).

BOYER (J.), 1973. — Comportement du potassium dans les sols tropicaux cultivés. 10e coll. Inst. Inter. Potasse, Abidjan, 3-7 déc. : 83-102.

BOYER (J.), 1976. — L'aluminium échangeable : incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité. *Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol.*, IX, 4 : 259-269.

BOYER (J.), 1978. — Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides. ORSTOM, Init. Doc. Tech., 1 vol., 173 p.

BOYER (J.), 1980. — Toxicité apparente de certains engrais phosphatés et intoxication manganique induite. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, XVIII, 3-4.

BOYER (J.), COMBEAU (A.), 1960. — Etude de la stabilité structurale de quelques sols ferrallitiques de la République Centrafricaine. *Sols Africains*, V, I : 6-42.

BOYER (Ph.), 1956. — Les bases totales dans les matériaux de la termitière de Bellicositermes natalenses Hav. 6e Congrès Inter. Science du Sol, Paris, III, 17 : 105-110.

BOYER (Ph.), 1959. — De l'influence des termites de la zone intertropicale sur la configuration de certains sols. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, X, 1-2, 3-4, 41-44.

BRAMS (E.A.), 1971. — Continuous cultivation of west African soils : organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and soil* (The Hague), 35 : 401-414.

BRAMS (E.), 1973.— Residual soil phosphorus under sustained cropping in the humid tropics. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 37, 4 : 579-583.

BRAUD (M.), 1962. — La fertilisation minérale du cotonnier en République Centrafricaine. *Coton et Fibres Tropicales*, XVII, I : 11-22.

BRAUD (M.), 1964. — Le soufre dans la fertilisation minérale du cotonnier. *Coton et Fibres Tropicales*, XIX, 3 : 357-362.

BRAUD (M.), 1966. — La fertilisation du cotonnier en Afrique Tropicale et à Madagascar. *Cot. et Fibr. Trop.*, XXII, 2 : 246-274.

BRAUD (M.), 1967 a. — La détermination des déficiences minérales dans la nutrition du cotonnier. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., I : 198-210.

BRAUD (M.), 1967 b. — La détermination des formules d'engrais en culture cotonnière. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., I : 755-767.

BRAUD (M.), 1967 c. — L'expérimentation sur les formes de phosphate en culture cotonnière. Colloque fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., I : 862-873.

BRAUD (M.), 1971. — La fertilisation potassique du cotonnier en Afrique tropicale. *Fertilité*, 39 : 5-15.

BRAY (R.H.), KURTZ (L.T.), 1945. — Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59 : 39-45.

BREMMER (J.M.), 1965. — Organic forms of nitrogen, *in* Methods of Soil Analysis, part. 2, chap. 85 : 1238-1255. C.A. Black Edit.

BROESHART (H.), 1956. — The application of foliar analysis to oil palm cultivation. *Tropical Agriculture,* Trin., 33, 3 : 238-243.

BROESHART (H.), FERWERDA (J.D.), KOVACHICH (W.G.), 1957. — Mineral deficiency symptoms of the oil palm. *Plant and Soil,* 8, 3 : 289-300..

BROWN (J.C.), 1961. — Iron chlorosis in plant. *Adv. Agron.*, 13 : 329-369.

BROWN (J.C.), 1966. — Maize growing in Nyasaland (Malawi) II fertilizer requirements. *Experimental Agriculture,* 2 : 49-60.

BROWN (D.A.), BEATENG (B.D.), 1971. — Weed control for young cocoa ; current work et the cocoa research institute of Ghana. C.R. conference des planteurs de Malaisie, Kuala-Lumpur.

BROWN (J.C.), FOY (C.D.), 1964. — Effect of Cu on the distribution of P, Ca and Fe in Barley plants. *Soil Science,* 98, 6 : 362-370.

BROYER (T.C.), CARLTON (A.B.), JOHNSON (C.M.), STOUT (P.R.), 1954. — Chlorine - a micronutrient element for higher plants. *Plant physiology,* 29, 6 : 526-532.

BRUGIERE (J.M.), 1954. — Le problème de l'humus dans l'utilisation rationnelle des sols de la vallée du Niari en agriculture mécanisée (Moyen Congo). 2e Conf. Interafricaine des Sols, Léopoldville, II : 1233-1231.

BRUGIERE (J.M.), 1956. — Etude des sols à caféiers du 2e secteur du Moyen Congo. Nos Sols. Brazzaville.

BRUNIN (Ch.), 1970. — La nutrition magnésienne des cocoteraies de Côte d'Ivoire. *Oléagineux*, 25, 5 : 269-274.

BUI HUU TRI, 1968. — Dynamique de la granulation du sol sous prairies. *Ann. Agron.* 19, 4 : 415-439.

BUI HUU TRI, MONNIER (G.), 1973. — Etude quantitative de la granulométrie des sols sous prairie de graminées. *Ann. Agron.*, 24, 4 : 401-424. Ann. Agron. 24, 6 : 651-672.

BURDIN (S.), EGOUMENIDES (Ch.), 1973. — Détermination de l'azote ammoniacal et nitrique dans les sols et les eaux. *Agron. Trop.*, 28, 12 : 1193-1199.

BUSCH (J.), 1958. — Etude sur la nutrition minérale du caféier Robusta dans le centre et l'ouest Oubangui. *Agron. Tropic.*, XIII, 6 : 732-760.

CABALA-ROSAND (F.P.), FASSBENDER (H.W.), 1970. — Formas del fosforo en suelos de la region cacaotera de Bahia, Brésil. *Turrialba,* 20, 4 : 439-444.

CABALA-ROSAND (F.P.), PIRES DO PRADO (R.), MIRANDA (E.R.), SANTANA (Mia B.), FONSECA (R.), 1967. — Defiences minerais e efeitos da adubação na região cacaueira de Bahia. Segunda conferencia internacional de pesquizas en cacão. Nov. Bahia (Brésil) : 436-441.

CABANETTES (J.P.), LE BUANEC (B.), 1974. — Etude de l'apparition d'une carence potassique dans un sol ferrallitique sur granite. *Agron. Tropic* XXIX, 6-7 : 675-684.

CABANETTES (J.P.), TRUONG BINH, EGOUMENIDES (C.R.), 1973. — Comparaison de trois méthodes de détermination du potassium dans un sol ferrallitique (deux méthodes chimiques et une méthode isotopique). *Agron. Trop.*, XXVIII, 12 : 1200-1206.

CABIREL (R.), 1972. — Mobilisation du potassium des sols par le Na TPB en relation avec le comportement des cultures. *Ann. Agron.*, XXVII, 3 : 355-367.

CADIMA-ZEVALLOS (A.), 1966. — Influencia da Erythrina glauca sobre alguns fatores édaficos associados com a produção do solo. Primeiro congresso pan americano de conservacão do solo. 12-29 Abril. Sâo Paulo, (Brésil) : 187-194.

CALVEZ (C.), OLIVIN (J.), RENARD (J.L.), 1976. — Etude d'une déficience en soufre sur jeunes palmiers à huile en Côte d'Ivoire. *Oléagineux,* 31, 6 : 251-255.

CAMARGO (N.M.), RODRIGUES (T.E.), 1979. — Guia de excursâo. XVII congresso brasileiro de Ciencia do solo (Manaus). Embrapa-Jardim Botânico. Rio Janeiro.

CAMARGO (O.A. de), VAN RAIJ (B.), 1976. — Relacões entre alumínio trocavel, bases trocaveis e pH em solos. Anais XV Congr. Bras. Ciencia do Solo : 95-101.

CAMUS (H.), BERTHAULT (C.), 1972. — Influence du couvert végétal sur la perméabilité des sols du bassin représentatif de Korhogo (Côte d'Ivoire). *Cah.* ORSTOM, *Sér. Hydrol.*, 9, 3 : 3-13.

CARVAJAL (J.F.), 1972. — Cafeto cultivo y fertilizacion. Institut Intern. Potasse (Bern), Edit., 141 p.

CASTAGNOL (E.), 1934. — Principes et méthodes de l'étude moderne des sols. C.R. Trav. IRAF, Indochine, Hanoï : 123-127.

CASTAGNOL (L.), 1950. — Problème des engrais minéraux dans les terres hautes tropicales. — Agronomie Tropicale, III, 4 : 184-186.

CELTON (J.), ROCHE (L.), VELLY (J.), 1973. — Acidité du sol et chaulage. Agronomie Tropicale, XXVIII, 2 : 123-130.

CERENA (comissâo de estudo dos recursos naturais), 1974. — Projeto de desenvolvimento agrícola de Foz do Aréia. CERENA, estado do Paranã, 81 p. multig.

CHABANNES (J.), BARBIER (G.), 1950. — Observations sur le microdosage de l'aluminium. Application à l'étude de l'alumine dite libre des sols. *Ann. Agron.*, 20, 1 : 1-9.

CHAMINADE (R.), 1936. — La rétrogradation du potassium dans les sols. *Ann. Agron.*, 6 : 818-830.

CHAMINADE (R.), 1963. — Procès verbal de la réunion sur les problèmes de fertilisation. Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières. Nogent sur Marne, 24 octobre. IRAT (Paris), 25 p. multig.

CHAMINADE (R.), 1965 a. — Recherches sur la fertilité et la fertilisation des sols tropicaux. Principes de base et techniques. *Agron. Trop.*, XX, 10 : 1014-1017.

CHAMINADE (R.), 1965 b. — Bilan de trois années d'expérimentation en petits vases de végétation. Mise au point technique. Résultats. *Agron. Trop., XX, 10 : 1801-1162.*

CHAMPION (J.), DUGAIN (F.), DOMMERGUES (Y.), MAIGNEN (R.), 1958. — Les sols de bananeraies et leur amélioration en Guinée Française. *Fruits,* 13, 9-10 : 415-462.

CHAN (H.Y.), PUSHPARAJAH (E.), 1972. — Productivity potentials of Hevea on west Malaysian soils : a preliminary assessment. Proc. Rubb. Res. Inst. Malaya First Conf. (Kuala-Lumpur), 97 p.

CHAN HEUN YIN, PUSHPARAJAH (E.), YEW FOONG KEONG, ZAINOL EUSOF, 1977. — A soil suitability technical grouping system for hevea. Proc. 3td ASEAN Soils Conference (Kuala Lumpur), *In* Planters'Bulletin, n° 152 : 135-146.

CHANG (S.C.), CHU (W.K.), 1961. — The fate of soluble phosphate applied to soils. *Journal of Soil Science*, (Oxford), 12, 2 : 286-293.

CHANG (S.C.), CHU (W.K.), ERH (K.T.), 1966. — Determination of reductant soluble phosphate in soils. *Soil Sci.*, 102, 1 : 44-45.

CHANG (S.C.), JACKSON (M.L.), 1957. — Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 84, 2 : 133-134.

CHAPMAN (T.), 1965. — Some investigations into factors limiting yields of the White Lisbon Yam (Dioscorea alata L.) under Trinidad conditions. *Trop. Agric.* (Trin.), 42, 2 : 145-151.

CHAO (T.T.), HARWARD (M.E.), FANG (J.C.), 1964. — Iron or aluminium coatings in relation to sulfate absorption characteristics of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28 : 632-635 (cité par Ségalen 1973).

CHARPENTIER (J.M.), MARTIN-PREVEL (P.), 1965. — Carences atténuées ou temporaires en éléments majeurs. Carences en oligo-éléments chez le bananier. *Fruits,* 20, 10 : 551-557.

CHARPENTIER (J.M.), MARTIN-PREVEL (P.), 1967. — Les carences minérales du bananier. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. I : 286-293.

CHARREAU (C.), 1972. — Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *Agron. Trop.*, 27, 9 : 905-929.

CHARREAU (C.), FAUCK (R.), 1970. — Mise au point de l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa (Casamance). *Agron. Trop.*, XXV, 2 : 151-192.

CHARREAU (C.), NICOU (R.), 1971. — L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. Chap. IV, les effets de l'intervention humaine sur le profil cultural et les rendements agricoles : le travail du sol avec ou sans enfouissement de matière végétale. *Agron. Trop.*, XXVI, 11 : 1183-1247.

CHAUDRY (I.A.), CORNFIELD (A.H.), 1966. — Determination of sulfur in soils and plant material. The sulphur Institute, Tech. Bull., n° 14.

CHAUDRY (F.M.), LONERAGAN (J.F.), 1972. — Zinc absorption by wheat seedlings. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 2 : 323-331.

CHAUVEL (A.), 1972. — Observations micromorphologiques de la partie supérieure des sols rouges ferrallitiques de Casamance (Sénégal). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, X, 4 : 343-356.

CHAUVEL (A.), FAUCK (R.), 1969. — Sur la mise en évidence et la caractérisation d'un horizon B dit de « comportement » dans les sols rouges de Casamance. C.R. Acad. Sci. (Paris), T 269 : 2080-2083.

CHAUVEL (A.), PEDRO (G.), 1978. — Sur l'importance de l'extrême dessication des sols (ultra-dessication) dans l'évolution pédologique des zones tropicales à saisons contrastées. C.R. Acad. Sci. (Paris), T 286, série D : 1581-1584.

CHAUVEL (A.), PEDRO (G.), TESSIER (D.), 1976. — Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaolinitiques. Etudes expérimentales. *Science du sol,* 2 : 101-113.

CHENERY (E.M.), 1954. — Minor elements in Uganda Soils. Proc. Second Interafrican soils conference (Leopoldville), 2 : 1157-1163.

CHENERY (E.M.), 1955. — Preliminary study of aluminium and the tea bush. *Plant and soil,* 6, 2 : 174-200.

CHENERY (E.M.), 1958. — Boron deficiency in tea. Nature (London), 181, 4606, 426.

CHENERY (E.M.), SCHOENMAEKERS (J.), 1959. — Magnesium deficiency in east african tea. *East Afric. Agric. J.*, 21, 1 : 25-27.

CHENG (B.T.), OUELETTE (G.J.), 1971. — Manganese availability in soils. *Soils and Fertilizers,* 34, 6 : 589-595.

CHOW (C.Y.), 1966. — Studies of Potassium effect on the quality of fruit crops in Taiwan. Potassium Symposium. Intern. Potash. Inst., Bern, (Switzerland) : 325-329.

CLAIRON (M.), 1969. — Etude expérimentale de l'influence du chaulage sur la mobilité du potassium et du magnésium dans deux types de sols acides. Bull. AFES, 2 : 3-6.

CLAISSE (G.), 1968. — Etude expérimentale de l'analyse aux trois acides. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.,* VI, 2 : 129-149.

CLARK (R.B.), 1977. — Effect of Al on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant Corn. *Plant and Soil,* 47 : 653-662.

CLARKE (A.L.), GRAHAM (E.R.), 1968. — Zinc diffusion and distribution coefficients in a soil as affected by soil texture, zinc concentration and pH. *Soil Sci.,* 105 : 409-418.

COCHEME (J.), FRANQUIN (P.), 1967. — Une étude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au sud du Sahara en Afrique Occidentale. Projet conjoint d'Agroclimatologie FAO, UNESCO, OMM. FAO Rome.

COELHO (F.S.), VERLENGIA (F.), s.d. — Fertilidade do solo. Edit. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas S.P. (Brésil), 384 p.

COINTEPAS (J.P.), 1956. — Premiers résultats des mesures d'érosion en Moyenne Casamance (Sénégal). 6e congrès international de la Science du sol, Paris, VI, 15 : 569-576.

COINTEPAS (J.P.), KAISER (R.), 1980. — Quatre années d'études pédo-agronomiques sur coton en RCA. ORSTOM (Centre de Bangui), 85 p. Miméo.

COLEMAN (R.), 1966. — The importance of sulfur as a plant nutrient in world crop production. *Soil Science,* 101, 4 : 230-239.

COLEMAN (N.T.), KAMPRATH (E.J.), WEED (S.B.), 1958. — Liming. *Advances in Agronomy,* 10 : 424-522.

COLEMAN (N.T.), RAGLAND (J.L.), CRAIG (D.), 1960. — An Unexpected reaction between Al-Clay or Al-Soil and $CaCl_2$. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* 21 : 419-420.

COLLING (G.H.), 1955. — *in* « Commercial fertilizers ». 5e édition, Mac Graw Hill Book editeur (New York), p. 331.

COLLINS (J.F.), BUOL (S.W.), 1970. — Effects of fluctuations in the eH-pH environment on Fe and/or Mn equilibria. *Soil Sci.,* 110, 2 : 11-118.

COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J.), GAUTHEYROU (M.), GIMPE (C.), SIEFFERMANN (G.), DELAUNE (M.), FUSIL (G.), 1970. — Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.,* VIII, 2 : 113-172.

COLOMBANI (J.), LAMAGAT (J.P.), THIEBAUX (J.), 1972. — Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz ; une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Cah. ORSTOM Série Hydrol.,* IX, 3 : 15-46.

COLONNA (J.P.), 1967. — Recherches sur la fertilisation minérale du riz en culture pluviale en République Centrafricaine. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 nov. I : 709-719.

COLONNA (J.P.), 1968. — Le riz et sa culture en République Centrafricaine. *Agron. Trop.,* XXIII, I : 11-23.

COMBEAU (A.), 1964. — Remarques sur les facteurs de variation des limites d'Atterberg. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.,* II, 4 : 29-39.

COMBEAU (A.), 1965. — Variations saisonnières de la stabilité structurale en région tempérée. Comparaison avec la zone tropicale. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.,* III, 2 : 123-135.

COMBEAU (A.), MONNIER (G.), 1961. — Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux, *Sols Africains,* VI, I : 5-62.

COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1963 a. — Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapport avec les courbes pF humidité. *Sciences du Sol,* 1 : 5-11.

COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1963 b. — Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.,* 3 : 17-26.

COMBEAU (A.), QUANTIN (F.), 1964 a. — Observation sur l'évolution à long terme de la stabilité structurale de certains sols tropicaux sous culture et sous jachère. 8e congrès international de la Science du Sol (Bucarest).

COMBEAU (A.), QUANTIN (P.), 1964 b. — Observations sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. *Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol.* I : 3-12.

COMBEAU (A.), SEGALEN (P.), BACHELIER (G.), 1970. — L'étude des sols au laboratoire : caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et biologiques, *in* « Techniques Rurales en Afrique », Chap. IV : 63-92. BDPA-ORSTOM (Paris) édit., 278 p.

CONCEICAO (T.M.L.), MONIZ (A.C.), OLIVEIRA (J.J.), SIEFFERMANN (G.), 1972. — Les sols à Montmorillonite sur gneiss de la zone tropicale humide de l'Etat de Bahia. Signification paléoclimatique. C.R. 4e congrès latino-américain de la science du sol, 12 sept., Maracay (Vénézuéla).

CONROY (E.), LAMBE (J.G.D.), 1962. — A phosphorus-magnesium interaction in tomato nutrition. *Nature,* 194 500.

COOLING (E.N.), JONES (B.E.), 1970. — The importance of Boron and NPK fertilizers to eucalyptus in the southern province Zambia. *East Afric. Agric. and For. Journal.* 36, 2 : 185-194.

COPE (F.), HUNTER (J.G.), 1967. — Interactions de l'azote et du phosphore. *Phosphore et Agriculture,* 21, 46, 1-34. « in » *Agronomie Tropicale XXII,* I : 361.

COPPENET (M.), 1969. — Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper. *Ann. Agron.,* 20, 2 : 111-143.

COPPENET (M.), 1970. — Rappel chronologique des principaux travaux effectués en France. *Ann. Agron.,* 21, 5 : 469-482.

CORNFORTH (I.S.), WALMSLEY (D.), 1971. — Methods of measuring available nutrients in west Indian Soils. I Nitrogen. *Plant and soil,* 35 : 389-399.

COSTA (A.S.), GALLO (J.R.), VAN RAIJ (B.), VALADARES (J.M.A.S.), 1977. — Pseudo-virose do algodoeiro induzida por toxicidade de manganès do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo,* 1, 2, 3 : 68-71.

COULTER (B.S.), 1969. — The chemistry of hydrogen and aluminium ions in soils, clay minerals and resins. *Soils and Fert.,* 32, 3 : 215-223.

COULTER (J.K.), 1972. — Soils of Malaysia. A review of investigations on their fertility and management. *Soils and Fertilizers,* 35, 5 : 475-498.

COULTER (J.K.), ROSENQUIST (E.K.), 1955. — Mineral nutrition of the oil palm. A study of the chemical composition of the frond in relation to chlorosis and yield. *Malayan Agric. J.,* 38 : 214-236.

CPCS, 1967. — Classification des sols. INRA service carte des sols de France (Versailles), 96 p. miméo.

CRAHET (M.), 1968. — Compte rendu d'une enquête sur l'interprétation des analyses de sols. ENSA-Grignon, 35 p. multig.

CROEGAERT (J.), KUCZAROW (W.), GANEFF (J.M.), 1954. — L'économie de l'eau de quelques sols congolais. C.R. deuxième conférence interafricaine des sols (Léopoldville), 9-14 août, I : 375-382.

CROWDER (L.V.), MICHELIN (A.), BASTIDAS (A.), 1964. — The response of Pangola grass (Digitaria decumbrens stent) to rate and time of nitrogen application in Colombia. *Tropic. Agric.* (Trin.), 41, 1 : 21-29.

CULOT (Ph.), LAUDELOUT (H.), 1957. — Rétrogradation et utilisation des engrais phosphatés dans les sols du Congo belge. *Pédologie* (Gand), VII : 162-168.

CULOT (J.P.), VAN WAMBEKE (A.), 1958. — Contribution à l'étude des déficiences minérales du caféier d'Arabie au Kivu. Publ. INEAC, Série Scientifique, n° 73. 105 p.

CUNARD (A.C.), LEE CHONG SOON, 1973. — The effect of varying levels of magnesium limestone, triple superphosphate and soil moisture on early vegetative growth in maize. *Malaysian Agric. J.,* 49, 4 : 455-468.

CUNNINGHAM (R.K.), 1964. — Micronutrient deficiency in cacao in Ghana soils. *Emp. J. Exper. Agric.,* 32, 125 : 42-50.

DABIN (B.), 1954. — Les problèmes de l'utilisation des sols à l'Office du Niger. 2e conférence interafricaine des sols. Léopoldville, II, 92 : 1162-1176.

DABIN (B.), 1956. — Considération sur l'interprétation agronomique des analyses de sols en pays tropicaux. 6e Cong. intern. Sci. Sol., Paris, IV : 403-409.

DABIN (B.), 1960. — Utilisation d'un indice de structure pour la détermination de la qualité physique des sols tropicaux. 7e congrès international Science du Sol, Madison, I : 311-320.

DABIN (B.), 1961. — Les facteurs de la fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. Bull. Ass. Fr. Etu. Sol., n° spécial : 108-130.

DABIN (B.), 1962. — Relations entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux. *Ann. Agron.,* 13, 2 : 111-140.

DABIN (B.), 1963. — Appréciation des besoins en phosphore dans les sols tropicaux. Les formes du phosphore dans les sols de Côte d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM, Série Pédol.,* 3 : 27-42.

DABIN (B.), 1964 a. — Etudes des formes du phosphore dans quelques sols des Antilles. Action sur l'alimentation phosphatée de la canne à sucre, *Cahiers ORSTOM, sér. Pédol.,* I : 5-11.

DABIN (B.), 1964 b. — Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM, série Pédol.,* I : 29-40.

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

DABIN (B.), 1968. — Compte rendu des débats du point I. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. 1967, « in » *Agron. Trop. :* 184-190.

DABIN (B.), 1970 a. — Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. *Cot. Fib. Trop.,* 25 : 213-234 et 289-310.

DABIN (B.), 1970 b. — Premiers résultats d'une enquête sur les teneurs en soufre des sols d'Afrique tropicale. Numéro spécial des *Annales Agronomiques.* Colloque sur le soufre en agriculture. Versailles (France). Nov. : 113-135.

DABIN (B.), 1971. — Evolution des engrais phosphatés dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée. *Phosphore et Agriculture,* 58 : 1-14.

DABIN (B.), 1973. — Techniques analytiques : valeurs comparées des différentes méthodes pour la détermination du potassium assimilable des sols. 10e coll. Inst. Inter. Potasse, Abidjan, 3-7 déc., p. 103-117.

DABIN (B.), 1974. — Evolution des phosphates en sols acides des régions tropicales. *Science du sol,* 2 : 87-104.

DABIN (B.), 1979. — Phosphorus deficiencies in tropical soils and its prejudicial effects on agricultural output. Conference about priorities for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics. IRRI. Los Banos, Laguna, Philippines, June 4-8.

DABIN (B.), LENEUF (N.), 1956. — Etude des sols de l'ouest de la Côte d'Ivoire. 1° / Vallée du Sassandra. Rapport mult. ORSTOM, cité par LENEUF, 1959.

DABIN (B.), LENEUF (N.), 1960. — Les sols de bananeraie en Côte d'Ivoire. *Fruits,* 15, 3 : 117-127.

DAGG (M.), 1958. — Structural effects of cattle trampling. EAFRO Record of Research. 16. Cité par STOBBS, 1969.

DALAL (R.C.), 1974. — Desorption of soil phosphate by anion exchange resin. *Comm. Soil Sci. Plant Analy.,* 5, 6 : 531-538.

DALAL (R.C.), 1975. — Hydrolysis products of solution and exchangeable aluminium in acid soils. *Soil Sci.,* 119, 2 : 127-131.

DALLAL (R.), 1973. — Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium hydroxyde-sodium carbonate solution. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 39 : 142-143.

DALLAL (R.), HALLSWORTH (E.G.), 1976. — Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and phosphorus uptake. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.,* 40, 4 : 541-546.

DAMOUR (M.), KILIAN (J.), 1967. — Etude de la stabilité structurale d'un sol ferrallitique de la côte Est de Madagascar (Vatomandry) sous différents stades de dégradation de la végétation naturelle. Coll. Fertilité Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. : 1530-1539.

DANIEL (C.), MANCIOT (R.), 1973. — La nutrition en chlore des jeunes cocotiers aux Nouvelles Hébrides. *Oléagineux,* 28, 2 : 71-72.

DANIEL (C.), OCHS (R.), 1975. — Amélioration de la production de jeunes palmiers à huile du Pérou par l'emploi d'engrais chloré. *Oléagineux,* 30, 7 : 295-298.

DARTIGUES (A.), 1964. — Les déficiences en zinc chez les végétaux et leurs causes. *Ann. Agron.,* 15, 6 : 667-691.

DAVIES, 1956. — Factors affecting molybdenum availability in soils. *Soil Sci.,* 81, 3 : 209-221.

DEB (B.C.), 1950. — Estimation of free iron oxides in soils and their removal. *J. Soil Science,* 1 : 212-220.

DECAU (J.), 1965. — Contribution à l'étude des conditions pédologiques et climatiques d'alimentation boratée de la luzerne dans les sols argilo-calcaires du sud-ouest de la France. *Science du sol* (Versailles), 2 : 121-147.

DE GEUSS (J.G., 1967. — Fertilizer guide for tropical and subtropical farming. Centre Etude de l'Azote, Zurich.

DE GEUSS (J.G.), 1973. — Fertiliser guide for the tropics and subtropics. Centre Etude de l'azote, Zurich, 774 p.

DELHAYE (R.J.), 1968. — Note sur la culture du pyrèthre en Dalmatie. Bulletin des recherches agronomiques de Gembloux, III, 3 : 432-470.

DELHAYE (R.J.), 1970 a. — Fumure du pyrèthre. Rétrospective de l'expérimentation au Congo et au Rwanda de 1948 à 1962. *Bulletin des recherches agronomiques de Gembloux,* V, 1 et 2 : 177-187.

DELHAYE (R.J.), 1970 b. — Essais d'introduction de la culture du pyrèthre en terres acides de haute altitude (Kivu Sud). *Bulletin des recherches agronomiques de Gembloux,* V, 1 et 2 : 188-193.

DEMOLON (A.), 1952. — Principes d'Agronomie, I Dynamique du sol. 5e édition, Dunod, édit., Paris, p. 468 à 470.

DEMOLON (A.), AUBERT (G.), 1952. — C.R. Acad. Sci. (Paris), t. 234 : 689, cité par DEMOLON, 1968.

DEMOLON (A.), BOISCHOT (P.), LAFON (J.), 1953. — Réaction de divers sols à l'apport des engrais phosphatés solubles, son importance dans l'établissement des fumures. *Ann. Agron.,* 4 : 291-330.

DENARIE (J.), 1968. — L'inoculation des légumineuses à Madagascar, résultats de l'expérimentation de la campagne 1966-1967. *Agron. Trop.,* XXIII, 9 : 925-966.

DENNIS (E.A.), TRUONG BINH, 1974. — A propos de la détermination du calcium isotopiquement diluable. Valeur L. *Agron. Trop.,* XXIX, 12 : 1263-1265.

DE TURK (E.E.), WOOD (L.K.), BRAY (R.H.), 1943. — Potash fixation in corn belt soils. *Soil Sci.,* 55 : 1-12.

DEV (G.), SHARMA (H.C.), 1971. — Effect of continued submergence on soil reaction, electrical conductivity and oxidizable matter. *J. Indian Soc. Soil Sci.,* 19, 4 : 369-373.

D'HOORE (J.), FRIPIAT (J.), 1948. — Recherches sur les variations de structure du sol à Yamgambi. Publ. INEAC, Série Scientifique, n° 38, 59 p.

DIAMOND (W.E. de), 1937. — Fluctuations in the nitrogen content of some Nigerian soils. *Emp. J. Exper. Agric.*, 5 : 264-280.

DIATTA (S.), FARDEAU (J.C.), 1978. — Etude au moyen de 33 PO_4^{---} et 42 K^+ de l'action des amendements organiques sur la régénaration des sols rouges dégradés du Sénégal. IAEA-FAO Intern. Symp. on the use of isotope and radiation in research on soil-plant relationships. Colombo, Dec.

DIEKMAHNS (E.C.), 1957. — A Boron deficiency in sisal (Agave sisalina). *East Afric. Agric. J.*, 22, 4 : 197.

DJOKOTO (R.K.), STEPHENS (D.), 1961. — Thirty long-term fertiliser experiments under continuous cropping in Ghana. II Soil studies in relation to the effects of fertilizers and manures on crop yields. *Empire J. Expet. Agric.* XXIX, 115 : 245-258.

DOBEREINER (J.), 1977. — Fixacâo de Nitrogênio em gramineas. *R. Bras. Ci. Solo*, 1, 1 : 1-54.

DOBEREINER (J.), DAY (J.M.), DART (P.I.), 1972. — Nitrogenase activity of the paspalum notatum. Azotobacter paspali association and oxygen sensitivity. *J. of Gen. Microbiology*, 71 : 103-116.

DOMMERGUES (Y.), 1954 a. — Biologie des sols forestiers du centre et de l'est de Madagascar. 5e congrès Intern. Science du Sol (Léopoldville), III : 24-28.

DOMMERGUES (Y.), 1954 b. — Modifications de l'équilibre biologique des sols forestiers. Mem. Inst. Scient. Madagascar, Série D, VI : 115-148.

DOMMERGUES (Y.), 1960 a. — La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *Agron. Trop.*, XV, 1 : 54-60.

DOMMERGUES (Y.), 1960 b. — Un exemple d'utilisation des techniques biologiques dans la caractérisation des types pédologiques. *Agron. Trop.*, XV, I : 60-72.

DOMMERGUES (Y.), 1960 c. — Influence du rayonnement infra-rouge et du rayonnement solaire sur la teneur en azote minéral et sur quelques caractéristiques biologiques des sols. *Agron. Trop.*, XV, 4 : 377-389.

DOMMERGUES (Y.), 1960 d. — Minéralisation de l'azote aux faibles humidités. 7th Intern. Congress of Soil Science, Madison (Wisc., USA), III : 672-678.

DOMMERGUES (Y.), 1963. — Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. *Rev. Bois et Forêts Tropiques.* 87 : 9-25.

DOMMERGUES (Y.), MANGENOT (F.), 1970. — Ecologie microbienne du sol. Masson Edit. (Paris), 786 p.

DROUINEAU (G.), MAZOYER (R.), 1962. — Contribution à l'étude de la toxicité du cuivre dans les sols. *Ann. Agron.* 13, 1 : 31-53.

DUBERNARD (J.), 1975. — L'apparition d'une déficience potassique au cours de rotations coton-cultures vivrières sur un sol ferrallitique de République Centrafricaine. *Cot. Fib. Trop.*, 30, 2 : 263-270.

DUCHAUFOUR (Ph.), 1965. — Précis de pédologie. 2e édition, Masson Edit., Paris, 481 p.

DUCHAUFOUR (Ph.), SOUCHIER (B.), 1980. — pH et besoin en chaux. C.R. Acad. Agric. France : 391-399.

DUGAIN (F.), 1959. — Le sulfate d'ammoniac dans le sol en culture bananière de bas fonds. *Fruits*, 14, 4 : 163-169.

DUGAIN (F.), 1960 a. — Etude sur la fertilité des sols de la plaine bananière du Cameroun. *Fruits* (Paris), 15, 4 : 153-170.

DUGAIN (F.), 1960 b. — Les analyses de sol et le « bleu » du bananier. 1re réunion Intern. Bananier. FAO et CCTA. Abidjan.

DUTHION (C.), 1966. — Réserve de potassium lentement libérable d'un sol de limon. C.R. Acad. Agric. France, : 90-97.

DUTHION (C.), 1968. — Le potassium dans le sol. *Revue de la potasse*, section 4, Nov.-Déc. Berne.

DUTHION (C.), GROSMANN (R.), 1971. — Utilisation du Na T P B pour l'extraction du potassium et application agronomique. *Science du Sol* (Versailles), 1 : 79-92.

DUVAL (L.), MAURICE (J.), 1970. — Le diagnostic des carences en oligo-éléments au moyen de l'analyse chimique des sols. *Ann. Agron.*, 2, 5 : 573-586.

DYER (B.), 1894. — On the analytical determination of the probably plant food in soils. *J. Chem. Soc.* : 65-115.

EGBE (N.E.), OMOTOSO (T.I.), 1972. — Nutrient deficiencies of cocoa in Nigeria. Intern. Cocoa Res. Conf., St Augustine, Trinidad, 8-18 jan. : 153-158.

EGNER (H.), RIEHM (H.), DOMINGO (W.R.), 1960. — Untersuchungen über die chemische Boden-analyses als grundlage für die Beurteilung des Narhstoffzustandes der Boden. I Chemische Extraktions methoden sur Phsophor und Kaliumbestimmung. K. Lantler-Hogsk. Ann., 26 : 199-215.

EID (M.T.), BLACK (C.A.), KAMPRATH (E.O.), 1954. — « *in* » Research Bull. Iowa Agric.. Expt. St. : 367.

EKPETE (D.M.), 1972. — Comparison of methods of available potassium assessment for eastern Nigeria soils. *Soil Sci.*, 113, 3 : 213-221.

ELGABALY (M.M.), 1950. — Mechanism of zinc fixation by colloidal clays and related minerals. *Soil Sci.*, 69, 3 : 167-171.

ELLIS (G.B.), KNESEK (B.D.), 1972. — Adsorption reactions of micronutrients in soils. « *In* » Micronutrients in Agriculture, Edit. Mortvedt (J.J.), Giodano (P.M.), Lindsay (W.L.),Publ. Soil Sci. Soc. Amer. (Madison).

ELMER (J.L.), GOSNELL (J.M.), 1963. — The role of Boron and rainfall on the incidence of a wattle dieback in east Africa. *East Afric. Agric. For J.*, 291 : 31-38.

ELTZ (F.L.F.), COGO (N.P.), MIELNICZUK (J.), 1977. — Perdas por erosâo em diferentes manejos de solo e coberturas vegetais em solo laleritico bruno avermelhado distrófico (Sao Jérônimo) I Resultados do primeiro año. *R. Bras. Ci. Solo*, 1, 2, 3 : 123-127.

ENWEZOR (W.O.), 1976. — Sulphur deficiences in soils of southeastern Nigeria. *Geoderma*, 15, 5 : 401-411.

ERIKSON (E.), 1952. — Composition of atmospheric precipitation. I Nitrogen compounds. *Tellus*, 4 : 145-270.

ESCOLAR (R.P.), 1967. — Use of molasses and distillery slops with sulphur for the reclamation of a saline-sodic and a sodic-soil from Puerto-Rico. J. Agric. Univ. Puerto-Rico, 51 : 55-65.

ENSMINGER (L.E.), 1954. — Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18 : 259-264.

ENSMINGER (L.E.), FRENEY (J.R.), 1966. — Diagnostic techniques for determining sulfur deficiencies in crops and soils. *Soil Sci.*, 101, 4 : 283-290.

ESPIAU (P.), PEYRONEL (A.), 1976. — L'acidité d'échange dans les sols. Méthode de détermination de l'aluminium échangeable et des protons échangeables. *Science du Sol*, 3 : 161-175.

EVANS (H.), 1955. — Studies in the mineral of sugar cane in British Guiana. *Trop. Agric.*, (Trin), 32, 2 : 124-133.

EVANS (W.H.), 1967. — Rapid complexometric determination of aluminium and total iron in silicate and other rock material. *Analyst*, 92 : 685-689.

EVANS (C.E.), KAMPRATH (E.J.), 1970. — Lime response as related to percent Al saturation, solution Al and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34, 6 : 893-396.

FALESI (I.C.), 1972. — Solos da rodovia transamazônica. IPEAN. Boletim técnico n° 55, Belêm, Para (Brésil), 195 p.

F A O, 1963. — Programme FAO d'engrais en Afrique. Colloque CCTA sur le riz en Afrique Tropicale. Conakry. 16-22 Juin.

F A O, 1976. — A framework for land evaluation. Soils Bulletin n° 32, 57 p.

FARDEAU (J.C.), CHABOUIS (C.), HETIER (J.M.), 1977. — Méthode des cinétiques de dilution isotopique des ions PO_4 et K : application à l'analyse des modifications de fertilité dans les essais de très longue durée. *Science du Sol*, 2 : 111-122.

FARDEAU (J.C.), GUIRAUD (G.), 1972. — Phosphore assimilable du sol et des engrais déterminé par la méthode de dilution isotopique. *Phosphore et Agriculture*, 26, 60 : 23-30.

FARDEAU (J.C.), GUIRAUD (G.), 1974. — Utilisation des filtres millipores en chimie du sol. Application à la caractérisation des cinétiques de dilution isotopique des ions dans le sol. *Ann. Agron.*, XXV, 1 : 113-117.

FARDEAU (J.C.), JAPPE (J.), 1980. — Choix de la fertilisation phosphorique des sols tropicaux : emploi du phosphore 32. *Agron. Trop.*, XXXV, 3 : 225-231.

FASSBENDER (H.W.), 1969. — Retencion y transformacion de fostates en ochrolatosolos de la Amazonia del Brasil. *Fitotecnia latino americana*, 6, 1 : 1-10.

FAUCK (R.), 1955. — Etude pédologique de la région de Sédhiou, Moyenne Casamance. *Agron. Trop.* X, 6 : 752-793.

FAUCK (R.), 1956 a. — L'évolution du sol sous culture mécanisée. Le problème du pH et sa correction. 6e congrès intern. *Science du Sol*, Paris, IV, 55 : 379-382.

FAUCK (R.), 1956 b. — Le riz de culture sèche et l'évolution des sols. 6e congrès intern. Science du Sol. Paris, R, 12 : 549-553.

FAUCK (R.), 1973. — Contribution à l'étude des sols des régions tropicales : les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. Mémoires ORSTOM (Paris), 259 p.

FAUCK (R.), MOUREAUX (C.), THOMANN (Ch.), 1969. — Bilans de l'évolution des sols de Sefa (Casamance, Sénégal), après 15 années de culture continue. *Agron. Trop.*, XXIV, 3 : 263-301.

FAUCONNIER (R.), 1962. — Aperçu sur quelques problèmes posés à la production de cannes à sucre dans la vallée du fleuve Sénégal et méthode expérimentale proposée. *Agron. Trop.*, XVII, 7-8 : 472-491.

FAUCONNIER (R.), BASSEREAU (D.), 1970. — La canne à sucre. Maisonneuve et Larose (Paris) Edit., 468 p.

FAURIE (G.), 1977. — Etude « in vitro » du rôle de la nitrification sur la lixiviation du calcium dans les sols calcaires. *Science du Sol*, 4 : 207-218.

FEILINGER (H.), CALDWELL (A.C.), SEIM (E.C.), 1972. — The performance of granular sulfur fertilizers. *Plant and soil*, 36, 2 : 315-323.

FELIPE-MORALES (C.), HANOTIAUX (G.), 1971. — Economie du sol en potassium . I Etude de certains facteurs écopédologiques locaux. *Pédologie* (Gand), 21, 3 : 294-310.

FEODOROFF (A.), 1964 et 1965. — Etudes expérimentales de l'infiltration de l'eau non saturante. Cas d'un sol initialement sec et d'un arrosage sans formation de plan d'eau en surface. *Ann. Agron.* (Paris), 15, 3 : 231-263 et 16, 2 : 127-175.

FERRAND (M.), BACHY (A.), OLLAGNIER (M.), 1951. — Les carences en oligo-éléments dans les sols du Moyen-Congo. C.R. Acad. Sci. Paris, 233 : 1218-1220.

FERREIRA DA SILVA (L.), OLIVEIRA DE MELO (A.A., 1970. — Levantamento detalhado dos solos do centro de Pesquizas do cacau. Boletim technico n° 1. CEPLAC-CEPEC. Itabuna, Bahia (Brésil), 88 p.

FIFE (C.V.), 1959. — An evaluation of ammonium fuoride as a selective extractant for aluminium-bound soil phosphate. I Preliminaries studies on non-soil systems. *Soil Sci.*, 87 : 13-21.

FISHER (R.A.), 1929. — A preliminary note on the effect of sodium silicate in increasing the yield of Barley. *J. Agric. Sci.*, 19 : 132-139.

FISKELL (J.G.A.), BRELAND (H.L.), LOCASCIO (S.J.), EVERETT (P.H.), 1967. — Effect of phosphate sources on Cu and Zm movement from mixed fertilizers and band placement. Pro Crop. Sci. Fla., 27 : 35-45.

FITTER (A.H.), SUTTON (C.D.), 1975. — The use of the Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *J. Soil Sci.*, 26, 3 : 241-246.

FORDE (C.M.), LEYRITZ (M.J.P.), SLY (J.M.A.), 1966. — The importance of potassium in the nutrition of the oil palm in Nigeria. *Rev. Potasse*, Juin et Juillet, Section 27.

FORESTIER (J.), 1959. — Fertilité des sols de caféières en République Centrafricaine. *Agron. Trop.*, XIV, 3 : 306-348.

FORESTIER (J.), 1960. — Fertilité des sols de caféiers en République Centrafricaine. III Etude des sols des caféiers de la Lobaye. *Agron. Trop.*, XV, 1 : 9-37.

FORESTIER (J.), 1964. — Relations entre l'alimentation du Coffea Robusta et les caractéristiques analytiques des sols. *Café, Cacao, Thé*, VIII, 2 : 89-112.

FORESTIER (J.), 1966. — Aspects nouveaux de l'emploi des engrais sur Coffea Robusta au Centre de Recherches de Boukoko (R.C.A.), *Café, Cacao, Thé*, X, 2 : 126-132.

FORESTIER (J.), 1968. — Le potassium et le caféier Robusta. *Fertilité*, 30 : 3-63.

FORESTIER (J.), BELEY (J.), 1969. — Variabilité de la nutrition minérale et de la production des clones de caféiers Robusta. *Café, Cacao, Thé*, XIII, 4 : 290-295.

FORSTER (L.J.), 1962. — Recent technical advances in the cultivation of the Tung oil tree, aleurites montana, in Nyassaland. *Trop. Agric., Trin.*, 39, 3 : 169-187.

FORSTER (H.L.), 1970. — Liming continuously cultivated soils in Uganda. *East Afric. Agric. For. J.*, 36, 1 : 58-69.

FORSTER (H.L.), 1971. — Rapid routine soil and plant analysis without automatic equipment. I Routine soil analysis. *East Afric. Agric. For. J.*, 37 : 160-170.

FORSTER (H.L.), 1972. — The identification of potentially K deficient soils in Uganda. *East Afric. Agric. For. J.*, 37, 3 : 224-233.

FOURNIER (F.), 1967. — La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain. *Sols Africains.* XII, 1 : 5-52.

FOX (R.L.), DE DATTA (S.K.), WANG (J.M.), 1964. — Phosphorus and aluminium uptake by plants from Latosols in relation to liming. Trans. 8th Inter. Cong. Soil Science (Bucarest), 4 : 595-603.

FOX (R.L.), HASAN (J.M.), JONES (R.C.), 1971. — Phosphate and sulfate sorption by latosols. Proc. Int. Symp. soil fertility evaluation, 1 : 857-864.

FOX (R.L.), PLUCKNETT (D.L.), WHITNEY (A.S.), 1968. — Phosphate requirements of Hawaiian latosols and residual effects of fertilizer phosphorus. Transl. Inter. Congr. Soil Sci. 9e cong. Adelaide (Austr.), 2 : 301-308.

FOY (C.D.), 1974. — Effects of aluminium on plant growth. « *In* » E.W. Carson. The plant root and its environment : 601-642. Edit. Univ. Press Univ. Sta. Charlottesville VA.

FOY (C.D.), BROWN (J.C.), 1964. — Toxic factors in acid soils. I Differential aluminium tolerance of plant species. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 1 : 27-32.

FRANKART (H.), CROEGAERT (J.), 1959. — Contribution à l'étude de la nutrition minérale du caféier robusta en Uélé. Publ. INEAC, Série Scientifique, n° 80. 107 p.

FRANQUIN (P.), 1958. — L'estimation du manganèse du sol en rapport avec le phénomène de toxicité. *Cot. Fib. Trop.* XIII, 3 : 1-16.

FRANQUIN (P.), 1967. — Analyse agroclimatique en régions tropicales. Les conditions hydriques. *Cah. ORSTOM, Série Biol.*, 5 : 15-24.

FRANQUIN (P.), 1973. — Analyse agroclimatique en régions tropicales. Méthode des intersections et période fréquentielle de végétation. *Agron. trop.*, XXVIII, 6-7 : 665-692.

FRANQUIN (P.), MARTIN (G.), 1962. — Bilan d'eau et conservation du sol au Niari. République du Congo. *Cot. Fib. Trop.*, XVII, 3 : 345-356.

FREITAS (L.M.M. de), VAN RAIJ (B.), 1975. — Residual effect of liming a latosol in Sâo Paulo. Brasil. « *in* » Soil Management in Tropical America. C.R. du séminaire CIAT, 10-14 fév. 1974, Cali, Colombie. Edité par North Carolina State University, Raleigh, N.C., USA, 1975.

FREMOND (Y.), OUVRIER (M.), 1971. — Importance pour le cocotier d'une nutrition minérale convenable dès la plantation sur sable côtier. *Oléagineux,* 26, 10 : 609-616.

FREMOND (Y.), ZILLER (R.), NUCE de LAMOTHE (M. de), 1966. — Le cocotier. Maisonneuve et Larose (Paris), Edit., 267 p.

FRENEY (J.R.), STEVENSON (F.J.), 1966. — Organic sulfur transformation in soil. *Soil Sci.,* 101, 4 : 307-316.

FRIED (M.), DEAN (L.A.), 1952. — A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.,* 73 : 263-271.

FRITZ (J.), 1967. — Essai de fertilisation azotée sur Chloris Gayana aux Colimaçons. Ile de la Réunion. Colloque fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., I : 1035-1045.

FRITZ (J.), 1971 a. — Recherches sur les productions fourragères effectuées pour l'IRAT. Réunion 1963-1970. *Agron. trop.*, XXXVI, 11 : 1248-1269.

FRITZ (A.), 1971 b. — La fertilisation minérale du cotonnier au Nord Cameroun. *Cot. Fib. trop.* (Paris), 26, 4 : 375-384.

FRITZ (A.), 1971 c. — La déficience en bore du cotonnier au nord Cameroun. *Cot. Fib. Trop.* (Paris), 26, 2 : 235-241.

FRITZ (A.), VALLERIE (M.), 1971. — Contribution à l'étude des déficiences minérales sous culture cotonnière au Nord Cameroun. *Cot. Fib. Trop.* (Paris), 26, 3 : 273-301.

GACHON (L.), 1966. — Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur du sol en relation avec la croissance des plantes. C.R. Acad. Agric., 52 : 1108-1116.

GAILLARD (J.P.), 1970. — Recherche d'un équilibre K/N dans la production de l'ananas frais au Cameroun. I Résultats agronomiques. *Fruits,* 25, 1 : 11-24.

GALRAO (E.Z.), SUHET (A.R.), SOUSA (D.M.G. de), 1978. — Efeito de micronutrientes no rendimento e composiçâo quimica do arroz (Oryza sativa L.) em solo de Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo,* 2, 2 : 129-132.

GANIRON (R.B.), ADRIANO (D.C.), PAULSEN (G.M.), MURPHY (L.S.), 1969. — Effects of phosphorus carriers and zinc sources on phosphorus - zinc interaction in corn. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* 33, 2 : 306-309.

GARGANTINI (H.), 1972. — Efeito da calagem no pH nos teores de cálcio mais magnésio e alumínio em perfis de solos de Cerrado. Tese Escola Superior da Agricultura, Luiz de Queiroz, Piracicaba, S.P., (Brésil).

GASTUCHE (M.C.), VIELVOYE (L.), DONDEYNE (P.), 1957. — La détermination des oxydes d'aluminium libres dans les sols. *Pédologie,* 7 : 74-88.

GENEVOIS (L.), 1967. — L'alimentation minérale des végétaux par la pluie. *J. Agron. Trop. Bot. Appl.,* 14, 12 : 582-597.

GESTIN (A.J.), ROUX (F.), 1974. — L'utilisation des herbicides pour l'entretien des jeunes cacaoyers. *Café, Cacao, Thé* (Paris), 28, 2 : 107-120.

GODEFROY (J.), 1974. — Evolution de la matière organique du sol sous l'influence du bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique. Thèse Doc. Ing. Université de Nancy, 166 p.

GODEFROY (J.), 1975. — Evolution des teneurs des sols en éléments fertilisants sous culture d'ananas. Caractéristiques chimiques des sols de Côte d'Ivoire. *Fruits* (Paris), 30, 12 : 749-756.

GODEFROY (J.), CHARPENTIER (J.M.), LOSSOIS (P.), 1969. — Action de la fumure organique sur les caractéristiques chimiques et structurales d'un sol de bananeraie. *Fruits* (Paris), 24, 1 : 21-42.

GODEFROY (J.), LACOEUILHE (J.J.), MARCHAL (J.), 1976. — Effet du chaulage sur la culture de l'ananas (Var. Cayenne lisse) dans un sol ferrallitique fortement désaturé. *Fruits,* 31, 10 : 603-615.

GODEFROY (J.), LASSOUDIERE (A.), LOSSOIS (P.), PENEL (J.P.), 1978. — Action du chaulage sur les caractéristiques physico-chimiques et la productivité d'un sol tourbeux en culture bananière. *Fruits,* 33, 2 : 77-90.

GODEFROY (J.), MELIN (Ph.), 1973. — Action des apports de soufre sur les caractéristiques chimiques d'un sol volcanique en culture bananière. *Fruits* (Paris), 28, 4 : 225-261.

GODEFROY (J.), MULLER (M.), ROOSE (E.), 1970. — Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de Basse Côte d'Ivoire, *Fruits* (Paris), 25, 6 : 403-420.

GODEFROY (J.), POIGNANT (A.), MARCHAL (J.), 1971. — Premiers résultats d'un essai de chaulage en culture d'ananas sur un sol de basse Côte d'Ivoire. *Fruits* (Paris), 26, 2 : 103-113.

GODEFROY (J.), ROOSE (E.J.), MULLER (M.), 1975. — Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du sud de Côte d'Ivoire. *Fruits* (Paris), 30, 4 : 223-235.

GODEFROY (J.), TISSEAU (M.A.), LOSSOIS (P.), 1972. — Evolution des propriétés agrochimiques d'un sol ferrallitique de basse Côte d'Ivoire sous culture d'ananas. Comparaison avec une jachère. *Fruits* (Paris), 27, 4 : 255-267.

GONZALES (E.E.), WOLF (J.M.), NADERMAN (G.), SOARES (W.V.), GALRAO (E.Z.), 1976. — Relacoês entre toxidez de alumínio, desenvolvimento de raizes, absorçâo de agua e producâo de milho num oxisol (latosolo vermelho escuro) do Distrito Federal. *Ciencia e Cultura* (São Paulo), 28, 2 : 181-182.

GORHAM (E.), 1958. — Free acid in British soils. *Nature,* 181 : 106.

GORING (C.A.I.), 1962 a. — The control of nitrification by 2 Chloro-6 (Tri-chloromethyl) pyridine. *Soil Sci.,* 93, 3 : 211-218.

GORING (C.A.I.), 1962 b. — The control of nitrification of ammonium fertilizer and urea by 2 chloro-6 (trichloromethyl) pyridine. *Soil Sci.,* 93, 6 : 431-439.

GOUNY (P.), PREVOT (P.), 1948. — Le calcium dans la nutrition minérale de l'arachide. C.R. Ac. Agric. T. XXXIV : 945-947.

GRAHAM (E.R.), FOX (A.L.), 1971. — Tropical soil potassium as related to labile pool and calcium exchange equilibria. *Soil Sci.,* 111, 5 : 318.

GRANT (C.J.), 1964. — Caractéristiques des sols liées à la culture irriguée du riz. Symposium sur la nutrition minérale du riz. Institut International de recherches sur le riz. Manille, Philippines, 23-28 Fév.

GRANT (P.M.), SHAXSON (T.F.), 1970. — The effect of ammonium sulphate fertilizer on the sulphur content of tea garden soils in Malawi. *Trop. Agric.* (Trin.), 47, 1 : 32-36.

GREENLAND (D.J.), 1965. — Is aerobic denitrification important in tropical soils? 6e cong. intern. Science du Sol. Paris, II, 52 : 765-769.

GREENLAND (D.J.), 1958. — Nitrate fluctuations in tropical soils. *J. Agric. Science,* 50 : 82-92.

GREENLAND (D.J.), 1959. — Nitrogen gains and losses in tropical soils. Third Inter-African soils conference, Dalaba, I : 531-535.

GREENLAND (D.J.), 1962. — Organic materials with stabilized natural soil agregates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* 28 : 529-532.

GREENLAND (D.J.), 1965. — Interaction between clay and organic compounds in soil. *Soils and fertilizers,* 28 : 415-426 et 521-532.

GREENLAND (D.J.), 1971. — Soils factors determining responses to phosphorus and nitrogen fertilizers used in tropical Africa. OAU/STRC Seminar on the environmental factors influencing the yield of cereal crops in tropical Africa. Dakar, 26-29th July.

GREENLAND (D.J.), NYE (P.H.), 1959. — Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallow. *J. Soil Science,* 10, 2 : 284-299.

GREENWOOD (M.), 1951. — Fertilizers trials with groundnuts in northern Nigeria. *Empire J. Expl. Agric.* 19, 76 : 225-241.

GREENWOOD (M.), 1954. — Sulphur deficiency in groundnuts in Northern Nigeria. 5e congrès international Science du Sol, Léopoldville, 3 : 245-251.

GRIFFITH (G.), MANNING (H.L.), 1949. — A note on nitrate accumulation in a Uganda soil. *Trop. Agric.* (Trin.), 26 : 108-110.

GUCKERT (A.), 1973. — Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agrégation. Thèse Université de Nancy, 124 p.

GUERRERO (R.M.), 1975. — Soils of the Eastern Region of Colombia. « *in* » Soil Management in Tropical America. C.R. du séminaire CIAT du 10-14 fév. 1974 à Cali, Colombie, édité par North Carolina State University-Raleigh, N.C. USA : 61-91.

GUILLAUME (M.), 1962 a. — Aperçu sur les possibilités de développement de la production du sucre au Mali. *Agron. Trop.,* XVII, 7-8 : 492-503.

GUILLAUME (M.), 1962 b. — Possibilités techniques et économiques de la production de sucre en Côte d'Ivoire. *Agron. Trop.,* XVII, 7-8 : 504-530.

GUILLEMOT (J.), LACHENAUD (J.L.), DORMOY (M.), 1973. — Quelques caractéristiques de sols des zones bananières de la Martinique. *Fruits* (Paris), 28, 5 : 335-349.

HADDAD (G.), SEGUY (L.), 1972. — Le riz pluvial dans le Sénégal méridional. Bilan de quatre années d'expérimentation 1966-1969. *Agron. Trop.,* XXVII, 4 : 419-461.

HAGENZIEKER (F.), 1957. — Soil nitrogen studies at Urambo, Tanganika territory, East Africa. *Plant and soil,* 9 : 97-113.

HALLAIRE (M.), 1961. — Irrigation et utilisation des réserves naturelles. *Ann. Agron.,* 12, 1 : 87-97.

HAINAUX (G.), TALINEAU (J.C.), FILLONNEAU (Cl.), BONZON (B.), PICARD (D.), 1973. — Bilan et dynamique du potassium sous cultures fourragères en zone tropicale humide. C.R. 10e Colloque Inst. Intern. Potasse, Abidjan, « Le Potassium dans les cultures et les sols tropicaux » : 291-303.

HARDY (F.), 1958. — Cocoa Soils. Proc. Soil and Crop Science Society of Florida. Vol. 18.

HARDY (F.), 1960. — Manual de cacau. Instituto Interamericano de ciencias agricolas, Turrialba (Costa Rica), 439 p.

HARDY (M.), 1965. — Rapport annuel. Mauritius Sugar Research Institute.

HARRIS (R.F.), ALLEN (O.N.), CHESTER (G.), 1964. — Mechanisms involved in soil agregate stabilization by fungi and bacteria. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28, 4 : 517-520.

HARRIS (R.F.), CHESTERS (G.), ALLEN (O.N.), 1966. — Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agron.* 18 : 107-169.

HATCHER (J.T.), BOWER (C.A.), 1958. — Equilibria and dynamics of boron adsorption by soils. *Soil Sci.*, 85, 6 : 319-323.

HATCHER (J.T.), BOWER (C.A.), CLARK (M.), 1967. — Adsorption of boron as influenced by hydroxyaluminium and surface area. *Soil Sci.*, 104, 6 : 422-426.

HAVORD (G.), WASOWICZ (T.E.), WHITE (R.G.), 1954. — Aggregate stability in a clay soil in relation to cacao cultivation. *Trop. Agric.* (Trin.), 31, 3 : 233-241.

HAYLOCK (O.F.), 1956. — A method for estimating the availability of non-exchangeable potassium. Inter. Cong. Soil Science, Paris, 13 : 403-408.

HEATHCOTE (A.), 1971. — The effects of potassium and trace elements on yields in Northern Nigeria. OAU/STRC Seminar on the environmental factors influencing the yield of cereal crops in Tropical Africa (Dakar), 26-29 juillet.

HEATHCOTE (R.G.), SMITHSON (J.B.), 1974. — Boron deficiency in cotton in Northern Nigeria. I Factors influencing occurrence and methods of correction. *Expl. Agric.*, 10, 3 : 199-208.

HEATHCOTE (R.G.), STOCHINGER (K.R.), 1970. — Soil fertility under continuous cultivation in northern Nigeria. II Responses to fertilizers in the absence of organic manures. *Exper. Agric.*, 6, 4 : 345-350.

HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1969. — Le profil cultural. Masson Edit. (Paris), 332 p.

HENIN (S.), MONNIER, 1958. — Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 1 : 71-90.

HENIN (S.), MONNIER (G.), COMBEAU (A.), 1958. — Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 1 : 73-92.

HENIN (S), TERNISIEN (J.), 1944. — Sur une relation entre la pluviosité, le drainage et l'évaporation, C.R. Académie des Sciences (Paris), 219 : 80-82.

HERRERA-VASCONEZ (C.), 1972. — L'analyse des sols comme base des recommandations pour la fertilisation des bananeraies. 2e réunion tech. FAO sur production bananière, oct. 1972, Guayaquil, Equateur. « *in* » *Fruits* (Paris), 29, 2 : 121-125 (édité en 1975).

HESSE (P.R.), 1957. — Sulfur and nitrogen changes in forest soils of east Africa. *Plant and soil*, 9, 1 : 86-96.

HINGSTON (F.J.), ATKINSON (R.J.), POSNER (A.M.), QUIRK (J.P.), 1967. — The specific adsorption of anions. *Nature*, 215 : 1459-1461.

HINGSTON (F.J.), ATKINSON (R.J.), POSNER (A.M.), QUIRK (J.P.), 1968. — Specific adsorption of anions on goethite. 9th Inter. Congr. Soil Sci. (Adélaïde). III : 669-677.

HINGSTON (F.J.), POSNER (A.M.), QUIRK (J.P.), 1972. — Anion adsorption by goethite and gibbsite. I The role of proton in determining adsorption enveloppes. *J. Soil Sci.*, 23, 2 : 177-192.

HINGSTON (F.J.), POSNER (A.M.), QUIRK (J.P.), 1974. — Anion adsorption by goethite and gibbsite. II Desorption of anions from hydrous oxide surface. *J. Soil Sci.*, 25, 1 : 16-26.

HOMES (M.V.), 1964. — Les interactions du soufre dans le sol et dans la plante. 5e Symp. Intern. Agrochimique : « Le soufre en agriculture ». Palerme. Catane, 16-21 mars.

HORN (M.E.), 1971. — Phosphorus and potassium fertility of some riceland soils in Indonesia. *Soil Science and Plant Analysis*, 2, 1 : 23-29.

HOROWITZ (A.), 1978. — Os ions do molibdênio no solo. Um exemplo da aplicacâo dos diagramas Eh-pH. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 2, 2 : 98-103.

HOVELER (R.N.), 1973. — Iron induced oranging disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded oxisol. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 37, 6 : 898-903.

HOYT (P.B.), 1967. — Chlorophyll-type compounds in soil. III Their significance in arable soils. *Plant and Soil*, XXVI, 1 : 5-13.

HULAGUR (B.F.), DANGARWALA (R.T.), MEHTA (B.V.), 1975. — Interrelationship among available zinc, copper and phosphorus in soil. *J. Indian Soc. Soil. Sci., 23 : 231-235.*

HUMBEL (F.X.), 1964. — Etude de quelques dépressions circulaires à la surface d'un plateau sédimentaire de Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, 2, 3 : 27-42.

HUMBEL (F.X.), 1974. — La compacité des sols ferrallitiques du Cameroun. Une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessication saisonnière. *Cah. ORSTOM. Série Pédol.*, 12, 1 : 73-101.

HUMBEL (F.X.), 1978. — Caractéristiques par des mesures physiques, hydriques et d'enracinement, de sols de Guyane française à dynamique de l'eau superficielle. *Science du Sol. Bulletin de l'AFES.* 2 : 83-84.

HUMBERT (R.P.), 1958: — Potash fertilization in the Hawaian sugar industry. Potassium symposium, Intern. Potash Inst., Bern, Switzerland : 319-344.

HUNTER (A.H.), PRATT (P.F.), 1957. — Extraction of potassium from soils by H_2SO_4. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21 : 595-598.

HUTTEL (Ch.), 1971. — Estimation du bilan hydrique dans une forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire. Symposium on the use of isotopes and radiation in research on soil plant. IAEA, Vienne, 13-17 déc. S.M. : 151-146.

IGUE (F.), FUENTES (R.), 1972. — Characterisation of aluminium in volcanic ash soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 2 : 292-296.

IRAT, 1973. — Rapport annuel 1971. *Agron. trop.*, XXVIII, 4 : p. 490.

IRCT, 1969. — Activité de l'IRCT en 1967-1968. Station Centrale de Bambari. Nature des engrais phosphatés. *Cot. Fibr. Trop.*, XXIV, 1 : 35-36.

IRHO (Département Palmier), 1968. — Les symptômes de carence en potasse chez le palmier à huile. *Oléagineux*, 23, 12 : 713-714.

IRHO (Département Palmier), 1968. — Les symptômes de carence en azote chez le palmier à huile. *Oléagineux*, 23, 1 : 648.

IRHO (Institut de Recherches sur les huiles et oléagineux, Paris), 1969. — Recherches agronomiques : principaux résultats sur différentes cultures tropicales : palmier à huile, cocotier, arachide. IRHO, rapport annuel 1969 : 19-22.

ISLAM (A), BOLTON (J.), 1970. — The effect of soil pH on potassium intensity and release of non-exchangeable potassium to ryegrass. *J. Agric. Sci.* (Cambridge), 75 : 571-576.

JACK (R.C.M.), 1961. — Nutrient imbalance in sugar-cane as revealed by foliar analysis. *Trop. Agric.*, (Trin.), 38, 3 : 221-223.

JACKSON (M.L.), Soil chemical analysis. Edit. Englewood cliffs, N.Y., Prentice Hall.

JACQUEMIN (H.), BERLIER (Y.), 1956. — Evolution du pouvoir nitrifiant d'un sol de basse Côte d'Ivoire sous l'action du climat et de la végétation. 6e congrès Intern. Science du Sol, Paris, III, 58 : 343-347.

JACQUINOT (L.), 1971. — Effet de la nature de l'alimentation azotée et du pH sur la croissance et la productivité du mil (Pennisetum typhoïdes). Séminaire CSTR-OUA sur les facteurs qui influencent le rendement des cultures céréalières en Afrique Tropicale. Dakar 26-29 juillet.

JADIN (P.), 1972. — Etude de la fertilisation minérale des cacaoyers en Côte d'Ivoire à partir du diagnostic « sol ». Intern. Cacao Res. Conf. St. Augustine (Trinidad), 8-18 jan. : 135-152.

JAIYEBO (E.O.), 1968. — Effect of drying and storage on the exchangeable potassium content of some western Nigeria soils. *Soil Sci.*, 106, 6 : 399-404.

JAIYEBO (E.O.), MOORE (A.W.), 1963. — Soil Nitrogen accretion under different covers in a tropical rain-forest environment. *Nature* (Lond.), 197 : 317-318.

JAIYEBO (E.O.), MOORE (A.W.), 1964. — Soil fertility and nutrient storage in different soil-vegetation systems in a tropical rain-forest environment. *Trop. Agric.*, (Trin.), 41, 2 : 129-139.

JENKINS (W.L.), 1966. — The relationship between « labile » soil phosphorus and the Al and Fe bound phosphorus in Tropical soils. *Plant and Soil*, 24 : 407-421.

JENKINSON (D.), 1968. — Chemical tests for potentially available nitrogen in soil. *J. Sci. Food Agr.*, 19 : 160-168.

JOHNSON (C.M.), NISHIA (H.), 1952. — Microdetermination of sulfur. *Analyt. Chem.*, 24 : 736-742.

JONES (H.T.), 1951. — Magnesium as plant nutrient. *Soils and Fertilizers*, 14 : 235-236.

JONES (M.J.), 1976. — Water movement and nitrate leaching in a Nigerian Savanna soil. *Expl. Agric.*, 12, 1 : 69-79.

JONES (M.J.), WILD (A.), 1975. — Soils of the west African savanna. Edit. Commonwealth Agric. Bureau, 246 p.

JORET (G.), HEBERT (J.), 1955. — Contribution à la détermination du besoin des sols en acide phosphorique. *Ann. Agron.*, VI, 2 : 233-299.

JULIA (H.), 1962. — La station de Sibiti. *Oléagineux*, 17, 4 : 356-360.

JURINAK (J.J.), BAUER (N.), 1956. — Thermodynamics of zinc absorption on calcite, dolomite and magnesite type minerals. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 20, 4 : 466-471.

JUSTE (C.), 1964. — Influence du chaulage sur la phytotoxicité de l'aluminium mobile d'un sol de défriche riche en colloïdes minéraux. *Ann. Agron.*, 15, 1 : 5-22.

JUSTE (C.), 1970. — Actions toxiques des oligo-éléments. *Ann. Agron.*, 25, 5 : 549-571.

KABAARA (A.M.), 1964. — Nitrate studies in a fertilizer experiment in Sukumaland, Tanganika. *East Afric. Agric. For. J.*, 30, 2 : 142-148.

KALPAGE (F.S.C.P.), 1967. — Manganese in soils and tea under Grevillea shade. *Trop. Agric.*, 44, 3 : 209-214.

KAMPRATH (E.J.), 1967. — Soil acidity and response to liming. Rech. Bull. 4 Intern. Soil Testing series N.C. State Univ. Agri. Exp. Sta. Raleigh, North Carolina.

KAMPRATH (E.J.), 1970. — Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 34 : 252-257.

KAMPRATH (E.J.), 1972. — Soil acidity and liming. « *in* » Soils of the humid tropics. Edit. Nat. Acad. of Science Washington, : 136-149.

KANEHIRO (Y.), SHERMAN (G.D.), 1967. — Distribution of total and 0,1 N HCl extractable zinc in Hawaian soil profiles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31 : 394-399.

KELLOG (C.H.), ORVEVAL (A.C.), 1969. — Potentially arable soils of the World and critical measures for their use. *Adv. Agron.*, 21 : 109-170.

KHAN (F.R.), AHMED (B.), AKUNTAR (J.), 1976. — Release of nutrient elements from soils as affected by fertilization moisture treatment. *Plant and Soil*, 44 : 455- 457.

KILLIAN (J.), 1964. — Etude pédologique des Baibos de la Bemarivo. *Agron. Trop.*, XIX, 11 : 998-1017.

KINJO (T.), KIEHL (E.J.), PRATT (P.F.), 1978. — Movimentos de nitratos em colunas de terra de um latossolo. *R. Bras. Ci. Solo*, 2, 2 : 106-109.

KINJO (T.), PRATT (P.J.), 1971. — Nitrate adsorption ; I In some acid soils of Mexico and South America. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35 : 722-725.

KINJO (T.), SILVEIRA (R.I.), KADEKARU (P.K.), 1978. — Retençâo de amônio em relaçâo a quantitade de fosfato adsorvido em solos latossolicos. *Revista de Agricultura.* L III, 12 : 23-27.

KLINGE (H.), 1972. — Biomassa y materia organica del suelo en el ecosystema de la pluviselva centro-amazonica. C.R. 4e congrès latino-américain de la Science du Sol (Caracas), Nov. 72.

KROLL (U.), 1963. — The effect of fertilizers, manures, irrigation and ridging on the yield of pyrethrum. *East Afric. Agric. For. J.*, 28, 3 : 139-145.

KUPPER (A.), GROHMAN (F.), GARGANTINI (H.), 1963. — Movimentos de ions NO_3^-, NH_4^+, K^+, PO_4 em solos Massapé, Roxa Misturada é Arenito de Bauru. Boletim n° 34, 3 p., Instituto Agrônomico de Campinas (cité par Van Wambeke, 1970).

LACHOVER (D.), 1966. — La réponse de l'arachide de bouche en culture irriguée à l'apport de produits calciques. *Oléagineux*, 21, 2 : 83-89.

LAL (R.), 1976 a. — Soil erosion on alfisols in western Nigeria. I Effects of slope, crop rotation and residue management. *Geoderma*, 16, 5 : 363-375.

LAL (R.), 1976 b. — Soil erosion on alfisols in western Nigeria. II Effects of mulch rates. *Geoderma*, 16, 5 : 377-387.

LAL (R.), 1976 c. — Soil erosion on alfisols in western Nigeria. III Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*, 16, 5 : 389-401.

LAL (R.), 1976 d. — Soil erosion on alfisols in Western Nigeria. IV. Nutrient element losses in runoff and eroded sediments. *Geoderma*, 16, 5 : 403-417.

LAL (R.), 1976 e. — Soil erosion on alfisols in western Nigeria. V The changes in physical properties and the response of crops. *Geoderma*, 16, 5 : 419-431.

LARSEN (S.), 1952. — The use of P 31 in studies on the uptake of phosphorus by plants. *Plant and soil*, 4 : 1-10.

LARSEN (S.), 1967. — Soil Phosphorus. *Adv. in Agronomy*. 19 : 151-210.

LARSEN (S.), WIDDOWSON (A.E.), 1964. — Effect of soil : solution ratio on determining chemical potentials of phosphate ions in soil solutions. *Nature* (London), 203 : 342.

LARSON (W.E.), 1954. — Response of sugar beet to potassium fertilization in relation to soil physical on moisture conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18 : 313-317.

LASSOUDIERE (A.), 1973. — La culture bananière dans la zone du Nieky (Agneby), en Côte d'Ivoire. *Fuirts* (Paris), 28, 3 : 171-187.

LASSOUDIERE (A.), 1973. — La carence en cuivre du bananier. *Fruits* (Paris), 28, 5 : 357-362.

LATHAM (M.), 1969. — Contribution à l'étude du facteur sol sur le développement du cotonnier en Côte d'Ivoire. Rapport interne ORSTOM, inédit, 62 p.

LATHAM (M.), 1971. — Rôle du facteur sol dans le développement du cotonnier en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM. Série Pédol.*, 9, 1 : 29-42.

LAUDELOUT (H.), 1950. — Etude pédologique d'un essai de fumure minérale de l'Elaeïs à Yangambi, Pub. INEAC, Série Scientifique, 47 : 21 p.

LAUDELOUT (H.), 1954. — Etude sur l'apport d'éléments minéraux résultant de l'incinération d'une jachère forestière. Conf. intern. sol 2, Léopoldville : 383-388.

LAUDELOUT (H.), 1961. — Dynamics of tropical soils in relation to their fallowing techniques. FAO Publication 11266, Roma. Cité par LAUDELOUT et VAN BLADER (1967).

LAUDELOUT (H.), VAN BLADEL (R.), 1967. — La jachère naturelle en région tropicale humide. Coll. Fert. Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., Vol. 2 : 1490-1497.

LE BUANEC (B.), 1972. — Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant du centre Côte d'Ivoire. *Agron. Trop.*, XXVII, 11 : 1191-1211.

LE BUANEC (B.), 1973. — Contribution à l'étude de la carence en phosphore des sols sur granite de la Côte d'Ivoire. Thèse Doc. Ing. Université d'Abidjan.

LE BUANEC (B.), 1974. — Observations sur l'ameublissement du profil cultural en sols ferrallitiques. Son incidence sur les caractéristiques du sol et sur la croissance des plantes cultivées. *Agron. Trop.* XXIX, 11 : 1079-1099.

LELONG (F.), BLANCHET (M.L.), GOVINDARAJU (K.), 1967. — Détermination quantitative par voie chimique des constituants minéralogiques des produits argileux d'altération tropicale. *Bull. Ass. Frse. Argiles,* 19, 1 : 49-67.

LE MARE (P.H.), 1959. — Soil fertility studies in three areas of Tanganika. *Emp. J. Expr. Agric.,* 27, 107 : 197-222.

LE MARE (P.H.), 1960. — Observations on the phosphate potentials of some tropical soils. Transl. 7th Inter. Cong. Soil Science (Madison), 3 : 600-603.

LE MARE (P.H.), 1972. — Response to triple superphosphate in Uganda soil. Rothamsted annual Report.

LE MARE (P.H.), 1977 a. — Experiments on effects of phosphorus on the manganese nutrition of plants. I. Effects of monocalcium phosphate on manganese in ryegrass grown in two Buganda soils. *Plant and Soil,* 47, 3 : 593-605.

LE MARE (P.H.), 1977 b. — Experiments on effects of phosphorus on the manganese nutrition of plants. II. Interactions of phosphorus, calcium and manganese in cotton grown with nutrient solution. *Plant and Soil,* 47, 3 : 607-620.

LE MARE (P.H.), 1977 c. — Experiments on effects of phosphorus on the manganese nutrition of plants. III. The effect of calcium-phosphorus ratio on manganese in cotton grown in Buganda soil. *Plant and Soil,* 47, 3 : 621-630.

LENEUF (N.), 1959. — L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse faculté Sciences, Paris, 210 p. Editeur Lang-Grandemange S.A. Paris.

LEVEQUE (A.), 1978. — Ressources en sol du Togo. Carte à 1/200.000 des unités agronomiques déduites de la carte pédologique. ORSTOM, Notice explicative, n° 73, 21 p.

LEVEQUE (L.A.), BELEY (J.), 1959. — Contribution à l'étude de la nutrition minérale de l'arachide (Arachis hypogea). Effets des toxicités borique et manganique. *Agron. Trop.,* XIV, 6 : 657.

LINDSAY (W.L.), 1972. — Inorganic phase equilibria of micronutrients in soils. « in » Micronutrients in agriculture, by J.J. Mortvedt, P.U. Giordano, W.L. Lindsay, pp. 46-48. Edit. Soil Sci. Soc. Amer. (Madison).

LIU CHANG-LANNG, 1976. — Effect of adsorbed magnesium on soil hydraulic conditivity. *J. Agric. Association of China* (Taipeh), n° 95 : 70-83.

LOEW (O.), 1892. — Über die physiologischen Funktion der Kalzium und Magnesium Salze und pflanzer Organisms. *Flora,* 75 : 368-394.

LOMBIN (L.G.), FAYEMI (A.A.A.), 1975. — Critical level of Mg on western Nigerian soils as estimated under greenhouse conditions. *Agron. J.,* 67, 2 : 272-275.

LOPES (N.A.), 1978. — Estudo da estabilidade estrutural de solos derivados de calcarios e embasemento cristalino em diversas regioês climáticas da Bahia. Tese Mestrado Geociencias. Universitade Federal de Bahia (Brésil), 55 p.

LOUE (A.), 1957. — La nutrition minérale du caféier en Côte d'Ivoire. Centre de recherches agronomiques, Bingerville, 207 p.

LOUE (A.), 1961. — Etude des carences et des déficiences minérales sur le cacaoyer. Publ. Inst. Fr. café cacao, Bull. n° 1, 52 p.

LOUE (A.), 1962. — Etude des carences et déficiences en potassium, calcium et magnésium chez le caféier Robusta. Inst. Fr. Café cacao thé, Bull. n° 4, 48 p.

LUTZ (J.F.), 1936. — The relation of free iron in the soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,* 1 : 43-45.

MACARTNEY (J.C.), NORTHWOOD (P.J.), DAGG (M.), DAWSON (R.), 1970. — The effect of different cultivation techniques on soil moisture conservation and the establisment and yield of maize at Kongwa, Central Tanzania. *Trop. Agric.,* 1971, 48, 1 : 9-23.

MACLEAN (A.J.), 1961. — Potassium supplying power of some canadian soils. *Canad. J. Soil Sci.,* 41 : 196.

MAC LEAN (A.J.), BRYDON (J.E.), 1963. — Release and fixation of potassium in different size fractions of some canadian soils as related to their mineralogy. *Canad. J. Soil Sci.,* 43 : 123.

MAC LEAN (E.O.), SIMON (R.H.), 1958. — Potassium status of some Ohio soils as revealed by green-house in laboratory studies. *Soil Sci.,* 85, 6 : 324-332.

MAC LEAN (A.H.), YAGER (J.U.), 1972. — Available water capacities of Zambian soils in relation to pressure plate measurement and particle size analysis. *Soil Sci.,* 113, 1 : 23-29.

MAIDA (J.H.A.), 1978. — Phosphate availability indices related to phosphate fraction in selected Malawi soil. *J. Sci. Food Agr.,* 29, 5 : 423-428.

MAIGNIEN (R.), 1980. — Manuel pour la description des sols sur le terrain. Edit. ORSTOM (Paris), 1 vol., 112 p.

MALAVOLTA (E.), 1967. — Manual de Química Agrícola. Adubos e adubacâo. 2e édition, Ceres éditeur (Sâo Paulo), 606 p.

MALAVOLTA (E.), 1976. — Manual de química agrícola. Nutricâo das plantas e fertilidade do solo. Edit. Agronomica Ceres (Sâo Paulo), 628 p.

MALAVOLTA (E.), CROCOMO (O.J.), ANDRADE (R.G.), 1964. — Effect of liming on the availability of P in Cerrado soils of Brazil. Proc. 3rd Int. Conf. Peaceful Uses of Atom. Energy, 15 : 507-510.

MALAVOLTA (E.), HAAG (H.P.), MELLO (F.A.F. de), BRASIL (M.O.C.), 1974. — Nutricaô mineral e adubaçâo de plantas cultivadas. Livraria Pionera Edit. (Sâo Paulo), 727 p.

MALAVOLTA (E.), SARRUGE (J.R.), BITTENCOURT (V.C.), 1977. — Toxidez de alumínio e manganês. IV Simposio sobre o cerrado : 275-301. Edit. Itatiala (Belo-Horizonte).

MANCIOT (R.), OLLAGNIER (M.), OCHS (R.), 1979 a. — Nutrition minérale et fertilisation du cocotier dans le monde. *Oléagineux*, 34, 11 : 499-515.

MANCIOT (R.), OLLAGNIER (M.), OCHS (R.), 1979 b. — Nutrition minérale et fertilisation du cocotier dans le monde. II Etude des différents éléments. *Oléagineux* 34, 12 : 563-580.

MANDRA (S.S.), 1973. — Manuring of sisal in Tanzania. A review of field trials. *Revue de la Potasse* (Berne), section 27, n° 12.

MARCHAL (J.), MARTIN-PREVEL (P.), MELIN (Ph.), 1972. — Le soufre et le bananier, *Fruits* (Paris), 27, 3 : 167-177.

MARTENS (J.W.), ARNY (D.C.), 1967. — Effects of potassium and chloride ion on root necrosis, stalk rot, and pith condition (Zea mays L.), *Agron. J.*, 59, 6 : 499-502.

MARTIN (D.), 1979. — Fertilité chimique des sols d'une ferme du Congo. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.* XVII, 1 : 47-64.

MARTIN (G.), 1958. — Essai de bilan des études pédologiques dans la vallée du Niari. « *Nos sols* » (Brazzaville), 7-8 : 41-45.

MARTIN (G.), 1959. — La décalcification des terres au Niari. Action des amendements calcaires. *Oléagineux*, 14 : 213-220.

MARTIN (G.), 1963. — Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, 2 : 8-14.

MARTIN (G.), 1967. — « *In* » quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari 1949-1964. 3e partie, Chap. II. Les études agropédologiques du centre ORSTOM de Brazzaville. L'évolution des sols sous culture : 131-138. Ministère de la Coopération éditeur.

MARTIN (G.), 1969. — Quelques symptômes de carences en bore chez le palmier à huile. *Oléagineux*, 24, II : 613-614.

MARTIN (G.), 1970. — Synthèse agropédologique des études ORSTOM dans la vallée du Niari en République du Congo Brazzaville. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, VIII, 1 : 63-79.

MARTIN (G.), 1971. — Le dessèchement des feuilles, maladie du palmier à huile dans la région du Nord-Santander en Colombie, *Oléagineux*, 26, 1 : 23-24.

MARTIN (G.), PRIOUX (G.), 1972.— Les effets de la fumure phosphatée sur le palmier à huile au Brésil. *Oléagineux*, 27, 7 : 351-354.

MARTIN (J.P.), 1971. — Decomposition and binding action of polysaccharides in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 3 : 33-41.

MARTIN (J.P.), PAGE (A.L.), 1965. — Influence of high and low exchangeable Mg and Ca percentages at different degrees of base saturation on growth and chemical composition of citrus plants. *Plant and Soil*, 22, 1 : 65-80.

MARTIN-PREVEL (P.), 1969. — Un essai « variantes systématiques » sur bananier. *Fruits* (Paris), 24, 4 : 193-215.

MARTIN-PREVEL (P.), DUGAIN (F.), 1962. — Potassium, calcium et magnésium dans la nutrition de l'ananas en Guinée. VI Le sol et l'alimentation de la plante. *Fruits*, 17, 5 : 211-227.

MARTIN-PREVEL (P.), MONTAGUT (G.), 1966. — Les interactions dans la nutrition minérale du bananier. *Fruits* (Paris), 21, 1 : 19-36.

MASCARENHAS (H.A.A.), MIYASAKA (S.), IGUE (T.), LOVADINI (L.A.), FREIRE (E.), 1967. — Adubacâo mineral do feijoeiro. XI Efeitos de N, P, K, e da calagem em campos cerrados du planalto Paulista. *Bragantia* (Brésil), 26 : 303-316.

MATHIEU (Ph.), MONNET (C.), 1970. — Apports chimiques par les eaux de pluie en savane et sous forêt en climat intertropical (Côte d'Ivoire). ORSTOM Abidjan, 153 p (miméo).

MATTHEWS (G.A.), 1972. — Effects of Nitrogen, sulphur, phosphorus and boron on cotton in Malawi. *Expl. Agric.* (Cambridge), 8, 3 : 219-224.

MASSAUX (F.), GESTIN (A.J.), MISSE (C.), 1974. — Etude de l'absorption radiculaire du cacaoyer à l'aide d'un traceur radioactif dans les conditions écologiques du sud-Cameroun. *Café, Cacao, Thé* (Paris), XVIII, 4 : 225-236.

MAURICE (J.), TROCME (S.), 1965. — Observations sur le bore dans le sol et dans les plantes. II Influence d'amendements calcaires sur le bore préexistant ou ajouté au sol. *Ann. Agron.*, 16, 5 : 579-593.

MAZOZERA (C.), BOUYER (S.), 1971. — Potassium et calcium labiles dans quelques types de sols tropicaux. Coll. FAO-IAAE, Vienne, Déc.

Mc BRIDE (M.B.), MORTLAND (M.M.), 1974. — Copper. II interactions with montmorillonite : evidence from physical methods. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, 3 : 408-415.

Mc CLUNG (A.C.), MARTINS (L.M.), FREITAS (L.M. de), 1959. — Sulfur deficiencies in soils from brazilian campos. *Ecology*, 40, 2 : 315-317.

Mc CLUNG (A.C.), FREITAS (L.M. de), LOTT (W.L.), 1959. — Analyses of several brazilian soils in relation to plant responses to sulphur. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 23, 3 : 221-224.

Mc LEAN (E.O.), HEDDLESON (M.R.), BARTLETT (R.J.), HOLOWAYCHUK (N.), 1958. — Aluminium in soils. I Extraction methods and magnitude in clays and Ohio soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 22, 5 : 382-387.

Mc LEAN (E.O.), HOURIGAN (W.R.), SHOEMAKER (H.E.), BRUMBLA (D.R.), 1962. — Aluminium in soils. V Form of aluminium as a cause of soil acidity and a complication in its measurement. *Soil Sci.*, 97, 2 : 119-126.

Mc WALTER (A.R.), WIMBLE (R.H.), 1976. — A long term rotational and manurial trial in Uganda. *Expl. Agric.*, 12, 3 : 305-317.

MEDINA (H.P.), GROHMANN (F.), 1966. — Disponibilidade de agua em algums solos do cerrado. *Bragantia*, 25, 6 : 65-76.

MEHLICH (A.), 1945. — Effect of type of soil colloid on cation adsorption capacity and on exchangeable hydrogene and calcium as measured by differents methods. *Soil Sci.*, 60 : 289-304.

MEHLICH (A.), 1960. — Charge caracteristics of soils. 7th Intern. Cong. Soil Sci. (Madison), II : 299-302.

MEHLICH (A.), 1964. — Influence of sorbed hydroxyl and sulfate on neutralisation of soil acidity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 23 : 101-105. Cité par Ségalen 1973.

MEHLICH (A.), 1968. — Coffee nutrition and the possible use of compound fertilizers in Kenya. Kenya Coffee, pp. 59-66.

MEHTA (N.C.), LEGG (J.O.), GORING (C.A.I.), BLACK (C.A.), 1971. — Determination of organic phosphorus in soils. I Methods. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 18 : 443-449.

MELIN (Ph.), 1970. — Effet de forts apports minéraux sur le bananier. *Fruits* (Paris), 25, 11 : 763-766.

MEKARU (T.), UEHARA (G.), 1972. — Anion adsorption in ferrugineux tropical soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 2 : 296-300.

MENGEL (K.), HAEDER (H.E.), 1973. — Kaliumvergügbarkeit und ihre Wirkung auf die Ertragsbildung der Kultur Pflanzen. *Revue de la potasse*, Section 6, n° 11.

MERWIN (H.D.), PEECH (M.), 1950. — Exhangeability of soil potassium in the sand, silt and clay fractions as influenced by the nature of the complementary exchangeable cation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 15 : 125-128.

METSON (A.J.), 1968. — The long term potassium supplying power of New Zeland soils. 9 th Intern. Cong. Soil Sci. (Adelaïde), 2 : 621-630.

MEYER (J.A.), 1959. — Fluctuations de l'azote minéral dans les sols sous cultures vivrières. III[e] conférence interafricaine des sols. Dalaba, Vol. I : 517-529.

MEYER (J.A.), 1963. — Ecologie et sociologie des microchampignons du sol de la cuvette centrale congolaise. Pub. INEAC, Série Scientifique, n° 101.

MEYER (J.A.), DUPRIEZ (G.L.), 1959. — Quantités d'azote et d'autres éléments nutritifs apportées au sol par les eaux de pluies au Congo Belge et leur intérêt agronomique. 3[e] Conf. Interafricaine des sols, Dalaba, I : 495-499.

MEYER (J.), PAMPFER (E.), 1959. — Nitrogen content of rain water collected in the humid central Congo basin. *Nature*, 184 : 717-718.

MIDDELBURG (H.A.), 1955. — Potassium in Tropical soils : Indonesian archipelago. Potassium Symposium. Intern. Potash. Inst., Bern (Switzerland) : 221-257.

MIELNICZUK (J.), 1977. — Formas do potássio em solos do Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 1, 2-3 : 56-61.

MIELNICZUK (J.), SELBACH (P.A.), 1978. — Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grando do sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 2, 2 : 115-120.

MIKKELSEN (D.S.), FREITAS (L.M.M.), Mc CLUNG (A.C.), 1961. — Efeitos da calagem e adubacâo de algodâo, milho e soja em tres solos de Campo Cerrado, Sâo Paulo, Brésil. IRI Research Institute, New-York, 29 p.

MILEY (W.N.), HARDY (G.N.), STURGIS (M.B.), SEDBERRY (J.E.), 1969. — Influence of Boron, Nitrogen and Potassium on yield, nutrient uptake and abnormalities of cotton. *Agron. J.*, 61, 1 : 9-13.

MILLIKAN (C.R.), 1947. — Effects of molybdenum on the severity of toxicity symptoms in flax induced by an excess of either manganese, zinc, copper, nickel or cobalt in the nutrient solution. *J. Austr. Inst. Agric. Sci.*, 13 : 180-186.

MIRANDA (E.R. de), IGUE (K.), 1972. — Quantitade-Intensidade de potassio em solos da regiâo cacaueira da Bahia. *Theobroma* (Itabuna, Brésil), 2, 3 : 47-55.

MITCHELL (R.L.), 1948. — Spectrographic analysis of soils, plants and related materials. Commw. Bur. Soil. Sci. Techn. Comm., 44.

MOHINDER SINGH (M.), 1970. — Results and discussion. Exchange reactions of potassium, magnésium and aluminium in some Malayan soils. Ph. D. dissertation, p. 45-151. Fac. of Sci., univ. of Malaya.

MOHINDER SING, TALIBUDEEN (O.), 1969. — Thermodynamic assessment of the nutrient statuts of rubber growing soils. *J. Rubber Res. Inst. Malaya,* 21, 2 : 240-249.

MOHR (W.), 1960. — A influencia da acidez sobre a fertilidade dos solos. 1er Cong. Nacional de Conservaçao dos solos, Campinas, Brésil.

MOITY (M.), 1954. — La carence en zinc sur bananier. *Fruits,* 9, 8 : 354.

MOITY (M.), 1961. — La carence en cuivre des tourbières du Nieky, Côte d'Ivoire. *Fuirts,* 16, 8 : 399-401.

MOKWUNYE (A.U.), MELSTED (S.W.), 1972. — Magnesium forms in selected temperate and tropical soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 5 : 762-764.

MOKWUNYE (U.A.), MELSTED (S.W.), 1973. — Magnesium fixation and release in soils of temperate and tropical origin. *Soil Sci.*, 116, 5 : 359-362.

MOLLE (A.), 1957. — L'alimentation minérale du caféier (Coffea canephora Pierre), Pub. INEAC, Série Scientifique n° 69, 163 p.

MONNIER (G.), 1963. — Enfouissement de la paille et structure du sol. Communication à la réunion du groupe Ile de France de l'AFES, CNRA Versailles. 2 déc.

MONNIER (G.), 1965. — Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agro.*, 16, 4 : 327-400 et 16, 5 : 475-534.

MOORE (A.W.), JAIYEBO (E.O.), 1963. — The influence of cover on nitrate and nitrifiable nitrogen content of the soil in a tropical rain forest environment. *Emp. J. Exp. Agric.*, 31 : 189-198.

MOORMAN (F.R.), 1972. — Soil microvariability, « in » Soils of humid tropics : 45-49. Edit. National Academy of Science (Washington), 1 vol. 217 p.

MORAIS (I.M.), SANTANA (J.L. de), CHEPOT-SILVA (R.E.), 1977. — A fertilizacâo do cacaueiro no Brasil. Doze anos de pesquizas. Boletim Técnico N° 55., 45 p. CEPLAC Edit., Itabuna, Brésil.

MOREL (R.), QUANTIN (P.), 1964. — Les jachères et la régénération du sol en climat soudano-guinéen d'Afrique Centrale. *Agron. Trop.*, XIX, 2 : 105-136.

MOREL (R.), QUANTIN (P.), 1972. — Observations sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (République Centrafricaine). *Agron. Trop.*, XXVII, 6-7 : 667-739.

MORGAN (M.F.), 1937. — The universal soil testing system, Univ. Connecticut Agri. Exp. Sta. Bull. : 392.

MOSS (P.), COULTER (J.K.), 1964. — The potassium status of west indian volcanic soils. *J. Soil Sci.*, 15, 2 : 284-298.

MOULINIER (H.). 1954. — Variations saisonnières de certains facteurs de la fertilité des sols. 5e Cong. Inter. Science du sol (Léopoldville), III : 288-291.

MOULINIER (H.), 1962. — Contribution à l'étude agronomique des sols de Basse Côte d'Ivoire. Inst. Fr. Café Cacao, Bull. n° 3, 70 p.

MOUREAUX (C.), 1959. — L'activité microbiologique et ses variations dans l'année en divers sols des hauts plateaux malgaches. *Mémoires Inst. Sci. de Madagascar,* D, IX : 121-199.

MOUREAUX (C.), 1967. — Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols ouest-africains. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, V, 4 : 393-420.

MULAMULA (H.A.), 1971. — Quelques facteurs tendant à affecter la production du blé au Kenya. Séminaire CSTR-OUA sur les facteurs qui influencent le rendement des cultures céréalières en Afrique Tropicale, Dakar, 26-29/7/71.

MUNSON (R.D.), NELSON (W.L.), 1963. — Movement of applied potassium in soils. *J. Agric. and Food Chem.*, 11 : 193-201.

MUNTZ (A.), 1907. — Rapport entre la constitution physique des terres et la distribution des eaux d'arrosage. *Ann. hydraulique,* fasc. 36 bis : 121-123.

MURPHY (R.C.), LANCASTER (J.D.), 1971. — Reponse of cotton to Boron. *Agron. J.*, 63, 4 : 539-540.

MUZILLI (O.), KALCKMANN (R.E.), MUNHOZ (F.G.), 1969. — Estudo da correçâo da acidez dos solos do estado do Parana. I Determinaçâo das curvas de neutralizaçâo em latossolos Roxo do oeste. *Rev. Esc. Agron. Veterin.* (Curitiba), 5 : 25-33.

MUZILLI (O.), SANTOS (D.), PALHANO (J.B.), MANETTI (J.), LANTMANN (A.F.), GARCIA (A.), CATANEO (A.), 1978.— Tolerancia de cultivares do soja e de trigo a acidez do solo. *R. Bras. Ci. Solo,* 2, 1 : 34-40.

NASH (V.E.), 1971. — Potassium release characteristics of some soils of the Mississipi coastal plains as revealed by various extracting agents. *Soil Sci.*, 111, 5 : 313-317.

NEELAKANTAN (V.), MEHTA (B.V.), 1961. — Copper status of soils of Western India. *Soil Sci,* 94, 4 : 245-256.

NELSON (W.L.), MEHLICH (A.), WINTERS (E.), 1953. — The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. *Agronomy,* 4 : 153-188.

NEMETH (K.), MENGEL (K.), GRIMME (H.), 1970. — The concentration of K, Ca and Mg in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca and Mg. *Soil Sci.*, 109, 3 : 179-185.

NEPTUNE (A.M.L.), MURAOKA (T.), 1978. — Uso de isótopos em quimica e fertilidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo,* 2, 3 : 151-163.

NEPTUNE (A.M.L.), TANATABAI (M.A.), HANWAY (J.J.), 1975. — Sulfur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus-sulfur relationships in some Brazilian and Iowa soils. *Soils Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, 1 : 51-55.

NERY (M.), ABRANTES (G.T.V.), DOS SANTOS (D.), DOBEREINER (J.), 1977. — Fixaçâo do nitrogénio em trigo. *R. Bras. Ci. Solo,* 1, 1 : 15-21.

NEWBOULD (P.), RUSSEL (R.S.), 1963. — Isotopic equilibration of calcium 45 with labile soil calcium. *Plant and Soil,* 18, 2 : 239-257.

NGO CHAN BANG, 1967. — Etude de l'azote minéralisable dans les sols de rizières. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. : 86-98.

NGO CHAN BANG, 1968. — Proposition de nouveaux indices pour caractériser la structure d'un sol. Applications à quelques cas agronomiques. *Agron. Trop.*, XXIII, 12 : 1309-1327.

NGO CHAN BANG, OLIVER (R.), FALAIS (M.), 1971. — Mise en évidence et étude d'un cas de toxicité manganique sur sol ferrallitique d'Ankétrakabe, Diego- Suarez, Madagascar. *Agron. Trop.*, XXVI, 3 : 355-375.

NG SIEW KEE, 1965. — Potassium status of some Malayan soils. *Malayan Agric. J.*, 45 : 143-161.

NG SIEW KEE, 1968. — Soil suitability for oil palms, « *in* » Oil Palm developments in Malaysia. Edit Turner.

NG SIEW KEE, 1977. — Review of oil palm nutrition and manuring scope for greater economy in fertilizer usage. *Oléagineux,* 32, 5 : 197-206.

NYE (P.H.), 1959. — The level of humus under the system of shifting cultivation. 3e Confer. Interafric. sols (Dalaba), I : 525-529.

NYE (P.H.), 1961. — Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and Soil,* 13, 4 : 333-346.

NYE (P.H.), 1963. — Soil analysis and the assesment of fertility in tropical soils. *J. Sci. Fd. Agric.*, 14 : 277-280.

NYE (P.H.), GREENLAND (D.J.), 1960. — The soil under shifting cultivation. Commonwealth Bur. Soils (Harpenden), comm. N° 51, 156 p.

NYE (P.H.), GREENLAND (D.J.), 1964. — Changes in the soil after clearing tropical forest. *Plant and Soil,* 21, 1 : 101-112.

OBI (A.O.), 1974. — The wilting point and available moisture in tropical forest soils of Nigeria. *Expl. Agric.*, 10, 4 : 305-312.

OBIHARA (C.H.), RUSSELL (E.W.), 1972. — Specific adsorption of silicate and phosphate by soils. *J. Soil. Sci.*, 23, 1 : 105-117.

OCHS (R.), 1965. — Contribution à l'étude de la fumure potassique du palmier à huile. *Oléagineux,* 20, 6 : 365-321 et 20, 8-9 : 497-501.

OCHS (R.), 1963. — Recherches de pédologie et de physiologie pour l'étude du problème de l'eau dans la culture du palmier à huile. *Oléagineux,* 18, 4 : 231-238.

OCHS (R.), 1968 a. — L'aménagement des sols et des eaux pour la culture du palmier à huile. Colloque d'Abidjan, II : 41-49.

OCHS (R.), 1968 b. — Principaux problèmes de la nutrition du palmier à huile. Colloque d'Abidjan, II : 420-436.

OCHS (R.), OLIVIN (J.), 1965. — Réserve en eau d'une palmeraie adulte. *Oléagineux,* 20, 4 : 231-235.

OCHS (R.), OLLAGNIER (M.), 1977. — Effet des engrais sur la composition des lipides produits par des oléagineux tropicaux pérennes et sur leur rendement. *Oléagineux,* 32, 10 : 409-422.

OERTLI (J.J.), 1961. — The effect of potassium and calcium (and other ions of earth alcali) on boron nutrition of plants. *Z. Pflanz. Dung. Boden,* 94 : 1-8.

OERTLI (J.J.), OPOKU (A.A.), 1974. — Interaction of potassium on the availability and uptake of iron from ferric hydroxide. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, 3 : 451-454.

OKE (O.L.), 1970. — Studies on the sulphur status of Nigerian soils and uptakes by grasses. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 18, 2 : 163-169.

OLIVEIRA (J.B. de), 1978. — *Classificâo baseada no potencial de fertilidade dos solos da quatricula de Campinas.* Inst. Agron., Boletim Técnico, n° 59 (Campinas).

OLIVEIRA-MORAIS, (F.I.), CABALA-ROSAND (F.P.), 1971. — Efeito dos equilibrios entre calcio, magnésio e potássio no desenvolvimento do cacaueiro. A publier dans la revue Theobroma du Centre de Recherches Cacaoyères (CEPEC) d'Itabuna (Brésil).

OLIVER (R.), DAMOUR (M.), VELLY (J.), RAZAFINDRAMONJY (J.B.), 1974. — Etude de la relation pH carence en bases sur trois sols hydromorphes des hautes terres malgaches. *Agron. Tropic.*, XXIX, 1 : 28-42.

OLIVER (R.), EGOUMENIDES (Ch.), PICHOT (J.), 1978. — Etudes en vases de végétation de la réorganisation de l'azote engrais dans un sol ferrallitique de Madagascar à l'aide de l'azote 15: *Agron. Trop.*, XXXIII, 3 : 213-220.

OLIVIN (J.), OCHS (R.), 1974. — Le lessivage du potassium et du magnésium en colonnes de terre. Premiers résultats expérimentaux. *Oléagineux*, 29, 4 : 175-182.

OLIVIN (J.), OCHS (R.), 1978. — Propriétés hydriques des sols et l'alimentation en eau des oléagineux en Afrique de l'Ouest. *Oléagineux*, 33, 1 : 1-12.

OLLAGNIER (M.), 1973. — La nutrition anionique du palmier à huile. Application à la détermination d'une politique de fumure minérale à Sumatra. *Oléagineux*, 28, 1 : 1-10.

OLLAGNIER (M.), LAUZERAL (A.), OLIVIN (J.), OCHS (R.), 1978. — Evolution des sols sous palmeraie après défrichement de la forêt. *Oléagineux*, 33, 11 : 537-544.

OLLAGNIER (M.), OCHS (R.), 1971. — La nutrition en chlore du palmier à huile et du cocotier. *Oléagineux*, 26, 6 : 367-372.

OLLAGNIER (M.), OCHS (R.), 1972. — Les déficiences en soufre du palmier à huile et du cocotier. *Oléagineux*, 27, 4 : 193-198.

OLLAGNIER (M.), OCHS (R.), 1973. — Interaction entre l'azote et le potassium dans la nutrition des oléagineux tropicaux. C.R. 10e colloque Inst. Intern. Potasse, Abidjan. Le potassium dans les cultures et les sols tropicaux : 215-231.

OLLAGNIER (M.), OCHS (R.), MARTIN (G.), 1970. — La fumure du palmier à huile dans le monde. *Fertilité*, 36, 2 : 3-64.

OLLAGNIER (M.), VALVERDE (G.), 1968. — Contribution à l'étude de la carence en bore du palmier à huile. *Oléagineux*, 23, 6 : 359-366.

OLLAT (C.), COMBEAU (A.), 1960. — Méthode de détermination de la capacité d'échange et du pH d'un sol. Relation entre le complexe absorbant et le pH. *Sols africains*, 5, 3 : 343-380.

OLMOS (J.), et *al.*, 1971. — Levantamento de reconhecimento dos solos do Nordeste do Estado do Paraná. Boletim técnico n° 16, Ministerio da Agricultura (Curitiba), 144 p.

OLMOS (I.L.J.), CAMARGO (M.N.), 1976. — Aocorrencia de alumínio tóxico nos solos do Brazil ; sua caracterizaçâo e distribuiçâo. *Ciencia e Cultura* (São Paulo), 28, 2 : 171-180.

OLSEN (S.R.), COLE (C.V.), WATANABE (F.S.), DEAN (L.A.), 1954. — *Estimation of available phosphorus in soils by* extraction with sodium bicarbonate. US Dep. Agric., Circ. n° 939.

OLSON (R.A.), 1970. — Work of IAEA (Vienne) and FAO (Roma) related to fertility of tropical soils. Committee on Tropical soils. London 8-18 June 1970, 12 p. multigr.

OLSON (R.A.), BERGER, 1946. — Boron fixation as influenced by pH, organic matter content and other factors. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 11 : 216-220. Cité par Oliver et *al.*, 1974.

OLSON (R.A.), ENGELSTAD (P.), 1972. — Soil phosphorus and sulfur. « in » Soils of the Humid Tropics, Nat, Acad. Sci., Washington, publ. p. 82-101.

OPUWARIBO (E.), ODU (C.T.I.), 1975. — Fixed ammonium in Nigerian soils. II Relationship between native fixed ammonium and some soil characteristics. *J. Soil Sci.*, 26, 4 : 350-357.

ORAM (P.A.), 1961. — Recent developments in the agricultural uses of Boron. *Agri. and Vet. Chem.*, 2, 4 : 145-150.

OSBORNE (R.E., HEWITT (C.W.), 1963. — The effect of frequency of application of nitrogen, phosphate and potash fertilizers on Lacatan bananas in Jamaica. *Trop. Agric.* (Trin.), 40, 1 : 1-8.

OSINAME (O.A.), KANG (B.T.), SCHULTE (E.E.), COREY (R.B.), 1973. — Zinc response of maize (Zea Mays) grown on sandy inceptisols in western Nigeria. *Agronomy J.* (Madison), 65, 6 : 875-877.

OTENG (J.W.), ACQUAYE (O.K.), 1971. — Studies on the availability of phosphorus in representative soils of Ghana. I Availability tests by conventional methods. *Ghana J. Agric. Sci.*, 4, 2 : 171-183.

OUELETTE (G.J.), 1963. — The potassium-boron relationship in cultivation of lucerne. *Canad. J. Soil Sci.*, 43 : 59-64.

PAAW (F. Van der), 1971. — An effective water extraction method for the determination of plant-available phosphorus. *Plant and Soil* (The Hague), 34 : 467-481.

PAGE (J.B.), BAVER (L.D.), 1940. — Ionic size in relation to fixation of cations by colloïdal clay. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 4 : 140-155.

PAL (U.R.), SAXENA (M.C.), 1975. — Responses of soybean to symbiosis and nitrogen fertilization under humid sub-tropical conditions. *Expl. Agric.*, 11, 3 : 221-226.

PAPENDICK (R.I.), PARR (J.F.), SMITH (S.), SMILEY (R.W.), 1971. — Nitrification inhibition in soils. II Evaluation of anhydrous ammonia-potassium acide solutions in eastern Washington. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35, 4 : 579-583.

PAVAGEAU (M.), 1951. — Estudos comparativos de alguns solos típicos do planalto central brasileiro. 3e Reuniâo Brasileira de Ciencia do solo (Recife), 2 : 585-635.

PELLOUX (P.), DABIN (B.), FILLMANN (G.), GOMEZ (P.), 1971. — Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange. ORSTOM. Initiation Documentation technique. 117 p.

PEREIRA (H.C.), 1954 a. — Soil structure criteria for tropical crops. C.R. 5e Cong. Int. Sci. du sol, 2 : 59-64.

PEREIRA (H.C.), 1954 b. — The assessment of structure in tropical soils. *J. Agric. Sci.*, 45 : 401-410.

PERRAUD (A.), NGUYEN KHA, JACQUIN (F.), 1971. — Essai de caractérisation des formes de l'humine dans plusieurs types de sols. C.R. Acad. Sci. (Paris), D 272, 12 : 1594-97.

PETERS (D.B.), 1972. — Atmospheric ammonia : absorption by plant leaves. *Science*, 175, n° 4023 : 771-772.

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

PICHOT (J.), ROCHE (P.), 1972. — Phosphore dans les sols tropicaux. *Agron. Trop.*, XXVII, 9 : 939-965.

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

PIDGEON (J.D.), 1972. — The measurement and prediction of available water capacity of ferrallitic soils in Uganda. *J. Soil Sci.*, 23, 4 : 431-441.

PIERRE (W.H.), MEISINGER (I.), BIRCHETT (J.R.), 1970. — Cation anion balance in crops as a factor in determining the effect of nitrogen fertilizers on soil acidity. *Agron. J.*, 62 : 106-112.

PIERI (C.), 1977. — Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal. *Agron. Trop.*, XXXII, 4 : 339-351.

PINKERTON (A.), BARRETT (M. W.), GUTHRIE (E.J.), 1965. — A note on copper deficiency in the Njoro area, Kenya. *East Afric. Agric. For. J.*, 30, 3 : 257-258.

PIOGER (R.), 1944. — Contribution à l'étude des sols en vue de l'irrigation. *Ann. Ecole Nation. Grignon*, 3, 4 : 148-168.

PIONKE (H.B.), COREY (A.B.), 1967. — Relations between acidic Al and soil pH, clay and organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 6 : 749-762.

POCHON (J.), BARJAC (H. de), 1956. — Traité de microbiologie des sols. Applications agronomiques. Ed. Dunod (Paris), 686 p.

POULAIN (J.F.), 1960. — Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux (Sol Dior). Les principaux facteurs de leur fertilité. Rapport de stage ORSTOM. Inédit.

POURRUT (P.), 1968. — Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques. Premiers résultats obtenus sur le bassin représentatif de la Tafaïna (République Malgache). Campagne 1966-67. *Cah. ORSTOM, Série Hydrol.*, 5, 2 : 15-31.

POUYAUD (B.), CHARTIER (R.), 1971. — Méthode thermodynamique de mesure de l'humidité des sols. *Cah. ORSTOM, Série Hydro-Bio*, VIII : 65-98.

PRATT (P.F.), 1965. — Potassium. « *in* » Methods of Soil Analysis, part 2. Black Ed., Madison : 1022-1030.

PRATT (P.F.), PETERSON (F.F.), HOLZLEY (C.S.), 1969. — Qualitative mineralogy and chemical properties of a few soils from Sâo Paulo, Brazil. *Turrialba*, 19, 4 : 491-496.

PREVOT (P.), OLLAGNIER (M.), 1964. — Carences en soufre de l'arachide en Afrique. 5e Symposium International Agrochimica. Le Soufre en Agriculture. Palerme-Catane. 16-21 mars.

PRINCE (A.L.), ZIMMERMAN (M.), BEAR (F.E.), 1947. — The magnesium supplying power of twenty New-Jersey soils. *Soil Sci.*, 63, 1 : 69-78.

PROCTER (J.E.A.), 1965. — Diseases of pines in the southern Highlands province, Tanganika. *East Afric. Agric. For. J.*, 31, 2 : 203-209.

PY (C.), 1963. — Recherches sur la fumure de l'ananas. Journées d'étude sur la nutrition minérale des plantes fruitières tropicales et subtropicales. Paris, 3-4 oct. *Fruits*, 18, 10 : 459-460.

PY (C.), 1965. — L'ananas. Maisonneuve et Larose Edit. (Paris), 298 p.

QUANTIN (P.), 1965. — Les sols de la République Centrafricaine. ORSTOM Edit., 115 p.

QUANTIN (P.), COMBEAU (A.), 1962. — Erosion et stabilité structurale du sol. Ass. Inter. Hydr. Surf., C.R. Colloque Bari, n° 53 : 124-130.

QUEMENER (J.), COLIN (R.), GARAUDEAUX (J.), 1974. — Liaison entre potassium extrait des sols par le tétraphényl borate de sodium et le potassium mis en évidence par des cultures en pots. *Science du sol* (Versailles), 2 : 105-117.

QUILLON, 1967. — Compte rendu des débats du groupe II-I. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. I : 41.

RADWANSKI (S.A.), 1957. — Cocoa soils of western Ashanti, Ghana. Cocoa, chocolate and confectionary alliance, proceedings of the cocoa conference. London.

RAJAN (S.S.S.), 1973. — Phosphorus adsorption characteristics of Hawaian soils and their relationships to equilibrium phosphorus concentration required for maximum growth of millet. *Plant and soil* (The Hague), 39 : 519-532.

RAJAN (S.S.S.), PERROTT (K.W.), SAUNDERS (W.M.H.), 1974. — Identification of phosphate reactive sites of hydrous alumina from proton consumption during phosphate adsorption at constant pH values. *J. Soil Sci.*, 25, 4 : 438-447.

RAJARATNAM (J.A.), 1973 a. — Application, absorption and translocation of Boron in oil palm. I Methods of application and types of boron fertilizer. II Age of palm, frequency of application and influence of N and K. *Expl. Agric.* (Cambridge), 9, 2 : 129-145.

RAJARATNAM (J.A.), 1973 b. — Movement and accumulation of boron in some Malaysian soils. *Expl. Agric.* (Cambridge), 9, 3 : 233-240.

RAJARATNAM (J.A.), LAW-ING-HOCK, 1975. — Effect of boron nutrition on intensity of red spider mite attack on oil palm seedlings. *Expl. Agric.*, 11, 1 : 59-63.

RAJENDRAN (N.), SUTTON (C.D.), 1970. — Re-sorption of the soil phosphate during fractionation. *J. Soil Sci.*, 16, 1 : 1-15.

RAMALHO (A.), PEREIRA (A.G.), BEEK (K.L.), 1978. — Sistema de avaliacâo de aptidâo agricola das terras. Minist. Agricul. Secr. Plan. Agricol. Suplan, Brasilia, 1 vol., 70 p.

RAMOS (M.), DEDECEK (R.), 1979. — Efeitos de sistemas de preparo do solo na producâo do soja. *Pesq. agropec. bras.* (Brasilia), 14, 2 : 149-153.

RAO VENKATA (B.V.), RAJAN GOVINDA (J.V.), 1960. — Influence of green manures on phosphate utilisation by crops. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 8, 3 : 145-149.

RAYNER (R.W.), 1951. — Tonic copper sprays. Mon. Bull. Coffee Bd Kenya, 16 : 212.

REDDY (R.N.S.), PRASAD (R.), 1975. — Studies on the mineralization of urea, coated urea and nitrification inhibitor treated urea in soil. *J. Soil Sci.* 26, 3 : 304-312.

REEVE (E.), SHIVE (J.W.), 1944. — Potassium-Boron relationship in plant nutrition. *Soil Sci.*, 57 : 1-14.

REEVE (N.G.), SUMNER (M.E.), 1970. — Lime requirements of Natal oxisols based on exchangeable aluminium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 34, 4 : 595-598.

REGO (M.J.M.), 1977. — Estudo pedológico e mineralógico de alguns solos da zona cacaueira da Bahia. Tese Mestr., Univ. Fed. Bahia (Brésil).

REITEMEIER (R.F.), 1951. — Soil Potassium. *Adv. in Agronomy*, 3 : 113-159.

RICHARD (C.), 1964. — Pluviométrie et étude physico-chimique des eaux de pluie. *Agron. Trop.*, XIX, 12 : 1073-1080.

RICHARD (L.), 1967 a. — Evolution de la fertilité en culture cotonnière. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov., II : 1437-1471.

RICHARD (L.), 1967 b. — Evolution de la fertilité en culture cotonnière intensive. *Cot. Fibr. Trop.*, XXII, 3 : 357-391.

RICHARDS (L.A.), 1954. — Diagnosis and improvement of saline and alcalis soils. USDA. Hand book n° 60.

RICHE (G.), SEGALEN (P.), QUANTIN (P.), LAMOUROUX (M.), 1974. — Les sols rouges de la partie nord du bassin du Wabi-Schebelle (Ethiopie). *Cah. ORSTOM, Série Pédologie*, XII, 3-4 : 237-247.

RIQUIER (J.), 1955. — Les effets du Krilium sur la structure de deux types de sols tropicaux. *Sols africains*, III, 2 : 238-249.

ROBINSON (J.B.D.), 1968. — Amélioration de la production agricole grâce à des engrais en Afrique Orientale. Colloque d'Abidjan. II : 61-68.

ROBINSON (J.B.D.), 1968. — Advisory soil and plant analysis methods with maize yield data. *East Afric. Agric. For. J.*, 34, 1 : 140-152.

ROBINSON (J.B.D.), CHENERY (E.M.), 1958. — Magnesium deficiency in coffee with special reference to mulching. *Emp. J. Exp. Agric.*, 26, 103 : 259-273.

ROBINSON (J.B.D.), GACOKA (P.), 1962. — Evidence of the upward movement of nitratd during the dry season in the Kikuyu red loam coffee soil. *J. Soil Science*, 13, 2 : 133-139.

ROBINSON (J.B.D.), SEMB (G.), 1968. — Advisory soil and plant analysis methods. *East Afric. Agric. For. J.*, 34, 1 : 117-127.

ROCHE (P.), 1967. — Contribution à l'étude du statut phosphorique des sols de Madagascar. Influence sur les problèmes de fertilité. *Agron. Trop.*, XXII, 3 : 249-308.

ROCHE (P.), DUBOIS (B.), 1959. — Mesures de ruissellement et d'érosion réalisées à Madagascar. 3e Conf. Inter-africaine des sols (Dalaba), II : 602-614.

ROCHE (P.), GRIERE (L.), BADRE (D.), CALBA (C.H.), FALLAVIER (P.), 1978. — La carence en phosphore des sols tropicaux et ses méthodes d'appréciation. C.R. 11e Cong. Intern. Sci. Sol (ISSS), (Edmonton), Juin.

ROCHE (P.), VELLY (J.), 1962. — Etude de l'évolution des éléments fertilisants apportés sur les principaux types de sols du Lac Alaotra. *Agron. Trop.*, XVII, 10 : 841-880.

RODRIGUEZ (J.M.), 1973. — Estudios de fertilidad de la region cafetera central de Antiocha. *Revista ICA* (Bogota), 8, 2 : 157-170.

RODRIGUEZ-SILVA (F.B.), JACOMINE (P.K.), ALMEIDA (J.C.), 1973. — Aptidâo agrícola dos solos do estado do Rio Grande do Norte. Boletim técnico n° 22 DNPA. Ministerio da Agricultura, Rio de Janeiro.

ROOSE (E.J.), 1967 a. — Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéa en Basse Côte d'Ivoire. Document interne ORSTOM. Inédit.

ROOSE (E.J.), 1967 b. — Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour la conservation des sols. Etudes expérimentales et observations sur le terrain. Rapport multig. ORSTOM Abidjan. 19 p. Inédit.

ROOSE (E.J.), 1967 c. — Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 19-25 Nov., II : 1385-1404.

ROOSE (E.J.), 1967 d. — Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agron. Trop.*, XXII, 2 : 123-152.

ROOSE (E.J.), 1970 a. — Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogénèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, 8, 4 : 469-482.

ROOSE (E.J.), 1970 b. — Erosion, ruissellement et lessivage oblique sur une plantation d'hévéa en basse Côte d'Ivoire. III Résultats des campagnes 1967, 1968, 1969. Rapport ORSTOM (Abidjan), 115 p., miméo.

ROOSE (E.J.), 1973. — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Centre ORSTOM Abidjan. Thèse Doc. Ing. Université d'Abidjan. 124 p. Miméo.

ROOSE (E.J.), 1974. — Influence du type de plante et du niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en climat tropical humide. Soc. Hydrotechnique (Paris 1974), XIIIe Journées de l'hydraulique. Question III, Rapport 13 : 1-17.

ROOSE (E.J.), GODEFROY (J.), 1968. — Lessivage des éléments fertilisants en bananeraie. *Fruits*, 23, 11 : 580-584.

ROOSE (E.J.), HENRY des TUREAUX (P.), 1970. — Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans un sol en place. *Agron. Trop.*, 25, 12 : 1079-1087.

ROOSE (E.J.), JADIN (P.), 1969. — Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à cacao de moyenne Côte d'Ivoire. Station IFCC près de Divo. I. Milieu, dispositif et résultats des campagnes 1967-1968. Rapport ORSTOM-IFCC (Abidjan), 76 p. Miméo.

ROOSE (E.J.), TALINEAU (J.C.), 1973. — Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur sol sableux de basse Côte d'Ivoire. C.R. 10e Coll. Inst. Intern. Potasse, Abidjan : 305-320.

ROSSITER (R.C.), 1955. — The influence of soil type on phosphorus toxicity in subterranean clover (Trifolium subterraneum). *Australian J. Agric. Res.*, 6 : 1-8.

ROSSITER (R.C.), 1951. — Phosphorus toxicity in subterraneum clover and oats grown on Muchea sand and the modifying effects of lime and nitrate-nitrogen. *Australian J. Agric. Res.*, 3 : 227-243.

ROSSITER (R.C.), 1952. — Studies on the nutrition of pasture plants on the South-West of Western Australia. *Australian J. Agr. Research*, 3 : 244-258.

ROUTCHENKO (W.), DELMAS (J.), 1963. — Etude de l'action des apports localisés d'engrais sur maïs. C.R. Acad. Agric. France, 49 : 131-138.

ROY (A.C.), ALI (M.Y.), FOX (R.L.), SILVA (J.A.), 1971. — Influence of calcium silicate on phosphate solubility in Hawaian latosols. Proc. Int. Symp. Soil Fert. Evaln., New Delhi, 1 : 757-765.

R.R.I.M., 1974. — Management of soil under hevea in Peninsular Malaysia. *Planters'Bulletin*, 134 : 147-155.

R.R.I.M., 1976 a. — Influence of fertilizers and covers on fertility of soils under hevea. *Planters' Bull.*, 142 : 8-13.

R.R.I.M., 1976 b. — Increased nitrogen manuring for avoiding oidium SLF. *Planters' bull.*, 146 : 120-124.

RYDEN (J.C.), Mc LAUGHLIN (J.R.), SYERS (J.K.), 1977. — Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.*, 28, 2 : 72-92.

RYDEN (J.C.), Mc LAUGHLIN (J.R.), SYERS (J.K.), 1977 b. — Time-dependent sorption of phosphate by soils and hydrous ferric oxydes. *J. Soil Sci.*, 28, 4 : 585-595.

RYDEN (J.C.), SYERS (J.K.), 1977. — Desorption and isotopic exchange relationships of phosphate sorbed by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.* 28, 4 : 596-609.

SAG (G.), 1956. — Influence de l'aluminium sur le développement de l'arachide. *Oléagineux,* II, 5 : 315-322.

SALMON (R.C.), 1963. — Magnesium relationships in soils and plants. *J. Sci. Food Agric.*, 14, 9 : 605-610.

SALMON (R.C.), 1965. — Changes in phosphate potential on rewetting air-dry soil. *Nature* (London), 205 : 316.

SALMON (R.C.), 1965 b . — Potassium exchange reactions in some Rhodesian soils. *Rhodesian J. Agric. Research.* 4, 3 : 15.

SALMON (R.C.), 1971 a. — Nutrient reserves in some soils from Rhodesian tribal trust lands and African purchase areas. *Rhodesian J. Agric. Research,* 9, 2 : 123-126.

SALMON (R.C.), 1971 b. — Residual effects of phosphate and potash applied to tobacco on granite sand. *Rhodesian J. Agric. Research.* 9, 2 : 129-130.

SAUNDER (D.H.), 1956. — Determination of available phosphorus in tropical soils by extraction with sodium hydroxide. *Soil Sci.*, 82, 6 : 457-463.

SAUNDERS (W.M.), WILLIAMS (E.G.), 1955. — Determination of total organic phosphorus in soils. *J. Soil Sci.*, 6, 2 : 254-260.

SAVORY (B.M., 1962. — Boron deficiency in Eucalyptus in Northern Rhodesia. *Emp. For. Rev.*, 41, 2 : 118-126.

SCHNITZER (M.), SKINNER (S.I.M.), 1967. — Organo-metallic interaction in soils : 7-Stability constants of Pb^{++}, Ni^{++}, Mn^{++}, Co^{++}, Ca^{++} and Mg^{++} fulvic acid complexes. *Soil Sci.*, 103 : 247-252.

SCHOFIELD (R.K.), 1955. — Can a precise meaning be given to available soil phosphorus ? *Soils and fertilizers,* 18, 5 : 373-375.

SCHUFFELEN (A.C.), VAN DER MAREL (H.W.), 1955. — Potassium fixation in soils. Potassium Symposium, Int. Potash Inst., Bern, : 157-201:

SCOTT RUSSEL (R.), RICKSON (J.B.), ADAM (S.N.), 1954. — Isotopic equilibria between phosphates in soil and their significance in the assessment of fertility by tracer methods. *J. Soil Sci.*, 5 : 85-105.

SEGALEN (P.), 1967. — Les sols de la vallée du Noum. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, V, 3 : 287-349.

SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, VI, 1 : 105-126.

SEGALEN (P.), 1971. — La détermination du fer libre dans les sols à sesquioxydes. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, IX, 1 : 3-27.

SEGALEN (P.), 1973. — L'aluminium dans les sols. ORSTOM, Série Initiat. Doc. Technique (Paris), n° 22 : 281 p.

SEGALEN (P.), LEAL SILVA (J.N.), 1969. — Le fer, le manganèse, l'aluminium et la silice facilement extractibles dans les sols tropicaux à sesquioxydes. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, VII, 3 : 287-310.

SEITZER (J.F.), BUTT (M.J.), MUMAMULA (H.A.), 1970. — Fertilizer responses to wheat in Kenya. *East Afric. Agric. For. J.*, 36, 1 : 131-138.

SEMB (G.), ROBINSON (J.B.D.), 1969. — The natural nitrogen flush in different arable soils and climates in East Africa. *East Afric. Agric. For. J.*, 34, 3 : 350-370.

SEMENT (G.), 1980. — Etudes des effets secondaires de la fertilisation minérale sur le sol dans des systèmes culturaux à base de coton en Côte d'Ivoire. Premiers résultats en matière de correction. *Cot. Fib. Trop.*, XXXV, 2 : 229-248.

SHAW (E.), DEAN (L.A.), 1952. — Use of ditizione as an extractant to estimate the nutrient status of soils. *Soil Sci.*, 73 : 341-342.

SHELTON (J.E.), COLEMAN (N.T.), 1968. — Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 1 : 91-94.

SHERMAN (G.D.), HARMER (P.M.), 1941. — Manganese deficiency of oats on alcaline organic soils. *J. Amer. Soc. Agron.*, 33 : 1080-1092.

SHIUE (J.J.), 1971. — A study on potassium supplying power of the lateritic soil in Taichung sugar cane field. Soils and fertilizers in Taïwan, p. 38.

SHOEMAKER (H.E.), Mc LEAN (E.O.), PRATT (P.F.), 1961. — Buffer methods for determining lime requirement of soil with appreciable amounts of extractable aluminium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 25, 4 : 274-277.

SHORROCKS (V.M.), 1964. — Boron toxicity in hevea brasiliensis. *Nature* (London), 204 : 599-600.

SHORROCKS (V.M.), 1964. — Mineral deficiencies in hevea and associated cover plants. Edit : Rubb. Res. Inst., Kuala Lumpur (Malaysia).

SIBAND (P.), 1972. — Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute Casamance. Principaux résultats. *Agron. Trop.*, XXVII, 5 : 574-591:

SIEFFERMANN (G.), 1973. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. Mémoire ORSTOM, n° 66, 183 p.

SILVA (J.A.), 1971. — Possible mechanisms for crop response to silicate applications. Proc. Intern. Symp. Soil Fertility Eval., New Delhi, 1 : 805-814.

SILVA (A.D. da), 1976. — Melhoramento genético para resistencia á toxidez de alumínio e manganès no Brazil : antecedentes, necessitades e possibilidades. Tópicos para discussâo e pesquizas. *Ciencia e cultura* (São Paulo), 28, 2 : 147-149.

SIMPSON (J.R.), 1960. — The mechanisms of surface nitrate accumulation of a bare fallow soil in Uganda. *J. Soil Sci.*, 11, 1 : 45-60.

SIMPSON (J.R.), 1961. — The effects of several agricultural treatments on the nitrogen status of a red earth in Uganda. *East Afric. Agric. For. J.*, 26, 3 : 158-163.

SIMS (J.R.), BINGHAM (F.T.), 1968. — Retention of boron by layer silicates, sexquioxydes and soil material. II Sesquioxides. III Iron — and aluminium — layer silicates and soil material. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 3 : 364-373.

SING (B.R.), KANEHIRO (Y.), 1969. — Adsorption of nitrate in amorphous and kaolinitic Hawaian soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33, 5 : 681-683.

SINGH (M.M.), 1971. — Assessment of the potassium status of an acid soil of Malaya by quantity-intensity relationships and its comparison with some conventional methods. Intern. Symp. Soil Fertility Evaluation (New Delhi), I : 75-83.

SINGH (Y.P.), GUPTA (R.N.), 1971. — Fertilizer response to the physical effects of soil compaction. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 19, 4 : 345-352.

SINGH (O.S.), SHARMA (V.K.), 1972. — Alterations in growth and metabolism of potato plants by calcium deficiency. *Plant and Soil*, 36, 2 : 363-369.

SISOV (L.L.), TRESCOV (A.G.), 1971. — El magnesio en los solos tropicales de Cuba. Beiträge zur tropischen und subtropischen Landwirtschaft and Tropenveterinar-medezin (Leipzig), 3 : 203-209.

SIVARAMAN NAIR (P.C.), MUKHERJEE (S.K.), 1970. — Studies of zinc deficiencies in Citrus. Causes of seasonal occurence of zinc deficiencies. Horticultural Research, AO : 1-13.

SIVASUBRAMANIAM (S.), TALIBUDEEN (O.), 1971. — Effect of aluminium on growth of tea (Camellia sinensis), and its uptake of potassium and phosphorus. *J. Sci. Food Agric.*, 22, 7 : 325-329.

SIVASUBRAMANIAM (S.), TALIBUDEEN (O.), 1972. — Potassium-Aluminium exchange in acid soils. I Kinetics. *J. Soil Sci.*, 23, 2 : 163-186.

SMITH (A.N.), 1960. — Boron deficiency in Grevillea robusta. *Nature* (London), 186 (4729) : 987.

SMITH (A.N.), 1963. — The chemical and physical characteristics of tea soils. *East Afric. Agric. For. J.*, 28, 3 : 123-125.

SMITH (A.N.), 1965. — Aluminium and iron phosphates in soils. *Austr. J. Agric. Sci.*, 31 : 110-126.

SMYTH (A.J.), 1966. — The selection of soils for cacao, Soil Bulletin n° 5, FAO Roma.

SMYTH (A.J.), MONTGOMERY (R.F.), 1962. — Soil and land use in Central Nigeria. Government printer, Ibadan, Western Nigeria. Cité par Wessel, 1967.

SOARES (W.S.), LOBATO (E.), GONZALES (E.), NADERMAN (G.C.), 1975. — Liming soils of the Brazilian Cerrado. « in » Soil Management in Tropical America. C.R. du Séminaire CIAT, 10-14 Fév. 1974, Cali, Colombie. Edité par North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. 1975.

SOBULO (R.A.), 1973. — Evaluation of analytical methods for determining potassium status of Nigerian soils. C.R. 10e colloque Inst. Intern. Potasse (Abidjan). Le Potassium dans les cultures et les sols tropicaux : 119-129.

SOLTNER (D.), 1971. — Les bases de la production agricole du sol. Collection Sciences et Techniques. (Sté Gemmes sur Lucre), 440 p.

STANFORD (G.), PIERRE (W.H.), 1946. — The relation of K-fixation to NH_4 fixation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 11 : 155-160.

STEPHANSON (R.C.), GRENLAND (D.J.), 1970. — Measurement of nitrogen and nitrous oxide evolution from soil plant systems using sealed growth chambers. *Soil Sci.*, 109, 3 : 203-210.

STEPHENS (D.), 1962. — The upward movement of nitrate in a bare soil in Uganda. *J. Soil Sci.*, 13, 1 : 52-59.

STEPHENS (D.), 1966. — Two experiments on the effects of heavy applications of triple superphosphate on maize and cotton in Buganda clay loam soil. *East Afric. Agric. For. J.*, 31, 3 : 283-290.

STEPHENS (D.), 1967 a. — The effects of different nitrogen treatments and of potash, lime and trace elements on cotton in Buganda clay loam soil. *East Afric. Agric. For. J.*, 32, 3 : 320-325.

STEPHENS (D.), 1967 b. — Effects of fertilizers on grazed and cut elephant grass leys at Kawanda research station Uganda. *East Afric. Agric. For. J.*, 32, 4 : 383-392.

STEPHENS (D.), 1967 c. — The effects of ammonium sulphate and other fertilizer and inoculation treatments on beans (Phaseolus vulgaris). *East Afric. Agric. For. J.*, 32, 4 : 411-417.

STEPHENS (D.), 1969. — The effects of fertilizers, manure and trace elements in continuous cropping rotations in Southern and Western Uganda. *East Afric. Agric. For. J.*, 34, 4 : 401-417.

STEWART (M.J.), 1969. — Potassium and sugar cane. South Afric. Sugar J., Febr. « *In* » *Rev. Potasse,* Août. Section 27, 47.

STEWART (B.A.), 1969. — N/S ratios as a guideline to sulphur needs. *The sulphur Inst. J.*, 5, 3 : 12-15.

STOBBS (T.R.), 1969. — The effect of grazing restling land upon subsequent arable crop yields. *East Afric. Agric. For. J.*, 35, 1 : 28-32.

STOOPS (G.), 1964. — Application of some pedological methods to the analysis of termite mounds. Coll. Inter. UNESCO, Léopoldville, 11-16. Masson Ed. Paris, p. 379-398.

STOREY (H.H.), LEACH (R.), 1933. — A sulphur deficiency disease of the tea-bush. *Ann. Appl. Biol.*, 20, 24 : 55.

STOUT (P.R.), MEAGHER (W.R.), PEARSON (G.A.), JOHNSON (C.M.), 1951. — Molybdenum nutrition of crop plants. I The influence of phosphate and sulfate on the absorption of molybdenum from soils and solution cultures. *Plant and Soil,* 3, 1 : 51-87.

STRASMAN (A.), QUIDET (P.), BLANCHET (R.), 1958 a. — Valeur comparée de divers tests analytiques relatifs au potassium du sol d'après la réaction des plantes. C.R. Ac. Agr., France, 144 : 639-642.

STRASMAN (A.), QUIDET (P.), BLANCHET (R.), 1958 b. — Dynamique du potassium dans le sol et alimentation des plantes. *Ann. Agron.*, 5 : 637-660.

STRUTRERS (P.H.), SIELING (D.H.), 1950. — Effect of organic anions on phosphate precipitation by iron and aluminium as influenced by pH. *Soil Sci., 69,* 3 : 205-213.

SULLIVAN (L.J.), 1972. — Les problèmes de l'augmentation de la concentration des engrais. Oligo-éléments. *Phosphore et agriculture.* 26, 60 : 1-15.

SURRE (Ch.), ZILLER (R.), 1963. — Le palmier à huile. Maisonneuve et Larose (Paris) Edit., 243 p.

SYS (C.), 1957. — L'aménagement des sols de la région d'Elisabethville d'après leurs caractéristiques analytiques et morphologiques. *Bull. Agric. Congo Belge.* 48, 6 : 1425-1432.

SYS (C.), 1978. — Evaluation of land limitations in the humid tropics. *Pédologie,* XXVIII, 3 : 307-335.

TAKAHASHI (E.), 1968. — Silica as a nutrient to the rice plant. *Japan Agric. Res. Quat.* 3, 3 : 1.

TALINEAU (J.C.), 1969. — Remarques sur quelques méthodes de détermination de la vitesse de filtration de l'eau dans un sol. *Agron. Trop.*, 24, 12 : 1169-1176.

TALINEAU (J.C.), LESPINAT (P.A.), 1971. — Evolution des profils hydriques relevés par la méthode neutronique sous quelques plantes fourragères en saison sèche. *Cah. ORSTOM, Série Biol.*, 14 : 3-19.

TAMINI (Y.N.), KANEHIRO (Y.), SHERMAN (G.D.), 1968. — Effects of time and concentration on the reactions of ammonium phosphate with a humic latosol. *Soil Sci.*, 105, 6 : 434-439.

TANAKA (A.), 1972. — Potassium in relation to iron toxicity of the rice plant. *Potash review* Inter-Potash Inst., 21 : 1-12.

TERMAN (G.L.), 1978. — Emploi d'isotopes dans la recherche sur la détermination de la valeur des engrais aux Etats-Unis. *Phosphate et Agriculture,* 21, 49 ; 1-10.

TERCINIER (G.), 1969. — Modifications apportées par la préparation conventionnelle des échantillons de terre à leurs propriétés physiques et hydriques. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, VII, 4 : 585-601.

THAM KAH CHENG, 1976. — Nutrient responses by pasture legumes on old rubber land soil of the Serdang series. *Malaysian Agric. J.*, 50, 4 : 452-461.

THORNE (W.), 1957. — Zinc deficiency and its control. *Adv. in Agronomy,* IX : 31-65.

THORNTON (I.), 1953. — Quelques observations sur la nodulation de l'arachide en Gambie. *Oléagineux,* 12 : 781-783.

THROWER (L.B.), 1960. — Observations on the disease of cocoa pod in Papua New Guinea. II. Cherelle wilt. *Tropic Agric.*, 37, 2 : 121-124.

THORP (J.), 1967. — Effects of certain animal that live in soil. « in » Selected papers in soil formation and classification. N° 1 in the selected Publi. Ser. : 191-208. (Soil Sci. Soc. Amer. Inc. Publisher. Madison, W., USA).

TIDBURY (G.E.), 1956. — Response of rice to certain fertilizers in Zanzibar. *Trop. Agri.*, (Trin.), 32, 2 : 113-126.

TIEDEMAN (N.A.R.), ANDERSON (T.D.), 1971. — Rapid analysis of total sulphur in soils and plant material. *Plant and Soil,* 35, 1 : 197-200.

TILLER (K.G.), HONEYSETT (J.L.), De VRIES (M.P.C.), 1972. — Soil zinc and its uptake by plants. II Soil chemistry in relation to prediction of avaibility. *Aust. J. Soil Res.*, 10, 2 : 165-182.

TINKER (P.B.), 1964. — Studies on soil potassium. III. Cation activity ratios in acid Nigerian soils. IV. Equilibrium cation activity ratios and responses to potassium fertilizer in Nigerian oil palms. *J. Soil Sci.*, 15, 1 : 24-41.

TINKER (P.B.), GUNN (J.S.), 1962. — Fertilizer requirements of the oil palm in Commonwealth West Africa. Cong. Int. Horticulture, 16. Bruxelles.

TINKER (P.B.H.), SMILDE (K.W.), 1963 a. — Cation relationships and magnesium deficiency in the oil palm. *J.W. Afric. Inst. Oil Palm Res.*, 4, 13 : 82-100.

TINKER (P.B.H.), SMILDE (K.W.), 1963 b. — Dry-matter production and nutrient content of plantation oil-palm in Nigeria. *Plant and Soil,* 19, 3 : 350-363.

TINKER (P.B.), ZIBO (H.C.), 1959. — Soil analysis and fertilizer responses. *J.W. Afr. Inst. Oil Palm Res.*, 3, 9 : 52-75.

TISSEAU (M.A.), 1959. — La déficience en cuivre et en zinc chez l'ananas : le crooknek. *Fruits,* 14, 9 : 363-367.

TITUS NYATSANGA, PIERRE (W.H.), 1973. — Effect of Nitrogen fixation by legumes on soil acidity. *Agron. J.*, 65 : 936-940.

TOLLENAAR (D.), 1959. — Increased cocoa production by foliar copper applications as an effect additional to witches broom disease control. *Tropic Agric.*, 36 : 177.

TOMLINSON (T.E.), 1957 a. — Relationship between Mangrove vegetation, soil texture, and reaction of surface soil after empoldering saline swaps in Sierra Leone. *Trop. Agric.*, Trin., 34, 1 : 41-50.

TOMLINSON (T.E.), 1957 b. — Changes in Sulphide containing mangrove soils on drying and their effect upon the suitability of the soil for the growth of rice. *The Empire exper. Agric.*, Oxford, XXV, 98 : 108-.....r.

TOMLINSON (T.E.), 1957 c. — Seasonal variations of the surface pH value of some rice soils of Sierra Leone. *Trop. Agric.*, Trin., 34, 4 : 287-294.

TOTTINGHAM (W.E.), 1955. — The role of chlorine in plant nutrition. *Ab. in Scien.* Sér. 42, n° 1071 : 68.

TOURTE (R.), VIDAL (P.), JACQUINOT (L.), FAUCHE (J.), NICOU (R.), 1964. — Bilan d'une rotation quadriennale sur sols de régénération au Sénégal. *Agron. Trop.*, XIX, 12 : 1033-1072.

TRIERWEILER (J.F.), LINDSAY (W.L.), 1969. — EDTA-Ammonium carbonate soil test for zinc. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33, 1 : 49-54.

TRINH (S.), 1976 a. — Les différentes formes des constituants alumineux dans les sols acides des pays d'Afrique. Thèse Doc. 3e cycle, Univ. Paris VI, 85 p.

TRINH (S.), 1976 b. — Rôle tampon des constituants alumineux dans les sols acides de quelques pays d'Afrique et à Madagascar. *Cah ORSTOM, Série Pédol.* XIV, 4 : 271-278.

TRUOG (E.), 1930. — The determination of the readily available phosphorus in soils. *J. Amer. Soc. Agron.*, 22 : 879-882.

TRUOG (E.), GOATES (R.J.), GERLOFF (G.C.), BERGER (K.C.), 1947. — Magnesium-phosphorus relationships in plant nutrition. *Soil Sci.*, 63, 1 : 19-25.

TRUONG (Binh), PICHOT (J.), 1976. — Influence du phosphore des graines de la plante test sur la détermination du phosphore isotopiquement diluable (valeur L). *Agron. Trop.*, XXXI, 4 : 379-386.

TRUONG (B.), PICHOT (J.), BURDIN (S.), 1973. — Etude des effets résiduels du phosphore dans deux sols ferrallitiques par diverses méthodes analytiques (chimiques et isotopiques). *Agron. Trop.*, 28, 2 : 147-155.

TRUONG (N.V.), ANDREW (C.S.), WILSON (G.L.), 1971. — Manganese toxicity in pasture legumes. II Effects of pH and molybdenum levels in the substrate. *Plant and Soil,* 34, 3 : 547-560.

TRUONG (N.V.), WILSON (G.L.), ANDREW (J.C.), 1971. — Manganese toxicity in pasture legumes. I. Effects of calcium and phosphorus levels in the substrate. *Plant and Soil,* 34, 2 : 309-330.

TURENNE (J.F.), 1969. — Déforestation et préparation du sol par brûlis. Modifications des caractères physico-chimiques de l'horizon supérieur du sol. C.R. 7e Réunion Caribbean Food. Crop Society (Fort de France), 7 : 294-304.

TURENNE (J.F.), 1975. — Modes d'humidification et différenciation podzolique dans deux séquences guyanaises. Thèse Doc. Sci. Univ. Nancy, Juin, 185 p.

TURENNE (J.F.), 1977. — Culture itinérante et jachère forestière en Guyane. Evolution de la matière organique. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.*, 15, 4 : 449-461.

TURNER (P.D.), 1967. — Oil palm diseases in Sabah. *The planter (Malaysia),* 43, 8 : 349-358.

TURNER (P.D.), BULL (R.A.), 1967. — Disease and disorder of the oil palm in Malaysia. Incopt. Soc. Planters, Kuala Lumpur, 247 p.

TURNER (G.O.), WARREN (L.E.), ANDRIESSEN (F.G.), 1962. — Effect of 2 chloro-6- (trichloromethyl) pyridine on the nitrification of ammonium fertilizers in field soils. *Soil Sci.*, 94, 4 : 270-273.

UEHARA (G.), KENG (J.), 1975. — Management implications of soil mineralogy in Latin America. « in » Soil Management in Tropical America. : 351-363. C.R. du séminaire CIAT du 10-14 Fév. 1974 à Cali, Colombie, édité par North Carolina University, Raleigh, NC, USA. 1975.

UMMAR AKBAR, TAMPULON (F.H.), AMIRUDDIN (D.), OLLAGNIER (M.), 1976. — Fertilizer experimentation on oil palm in North Sumatra. *Oléagineux,* 31, 7 : 305-313.

VALADARES (J.M.A.), 1972. — O Zinco em solos do estado de Sâo Paulo. Tese doutoramento, Piracicaba, 72 p. « In » resumos de teses Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz (S.P. Brésil).

VALENTE-ALMEIDA (L.A.), BROCHADO de MIRANDA, 1954. — Les formes du phosphore dans les sols de l'Angola. 5e Cong. Intern. Science du sol (Léopoldville), 3 : 263-267.

VALLANCE (L.G.), 1951. — Recent advances in sugar-cane culture in Queensland. *Emp. J. Exper. Agric.*, January. : 13-25.

VANCOMPERNOLLE (G.), STOOPS (G.), KAYENGA (J.), 1965. — Analyse quantitative de quelques éléments traces dans les sols congolais par fluorescence aux rayons X. *Pédologie* (Gand), XV, 1 : 5-47.

VAN RAIJ (B.), 1974. — Calibracâo do potássio trocavel em solos para feijâo, algodâo e cana de azucar. *Ciencia e Cultura* (São Paulo), 26, 6 : 575-579.

VAN RAIJ (B.), 1978. — Selecâo de metodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 2, 1 : 1-9.

VAN RAIJ (B.), DOVICHI-SACCHETTO (M.T.), IGUE (T.), 1968. — Correlacões entre o pH e o grau de saturacâo em bases nos solos com horizonte B textural e horizonte B Latossólico. *Bragantia* (Campinas), 27, 17 : 193-200.

VAN ROOYEN (P.C.), WEBER (H.W.), 1977. — Long term effects of five ameliorants on a saline-sodic soil of south Africa. *Geoderma*, 19, 3 : 213-225.

VAN WAMBEKE (A.), 1970 a. — Congo Kinshasa : Status of soil studies. Committee on tropical soils. London 8-12 June. 13 p. Multig.

VAN WAMBEKE (A.), 1970 b. — Soils studies in tropical Latin America. Part II Soil fertility. Committee on tropical soils. London 8-12 June. 50 p. Multig.

VAN WAMBEKE (A.), 1971. — Recherches sur la mise en valeur agricole des sols acides des savanes arborées du Brésil. *Pédologie* (Gand), 21, 2 : 211-255.

VAN WAMBEKE (A.), 1974. — Management properties of ferralsols. FAO Soils Bulletin, n° 23, 129 p.

VEITCH (F.P.), 1904. — Comparison of methods for the estimation of soil acidity. *J. Amer. Chem. Soc.*, 26 : 637-662.

VELLY (J.), 1972 a. — Fertilisation potassique en rizières. Compte rendu de trois campagnes d'expérimentation à la station d'Ivoloina (Tamatave), *Agron. Trop.*, 27, 6-7 : 655-666.

VELLY (J.), 1972 b. — Fertilisation potassique des sols tropicaux. *Agron. Trop.* 27, 9 : 966-976.

VELLY (J.), 1974. — Observations sur l'acidification de quelques sols à Madagascar. *Agron. Trop.*, XXIX, 12 : 1249-1262.

VELLY (J.), CELTON (J.), ROCHE (P.), 1967 a. — Fertilisation de redressement après diagnostic des carences minérales sur les sols de culture sèche de Madagascar. I. Sols ferrallitiques acides. Colloque fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 19-25 Nov., II : 874-888.

VELLY (J.), CELTON (J.), ROCHE (P.), 1967 b. — Fertilisation de fond en rizière de Madagascar. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 19-25 Nov., I : 916-991.

VELLY (J.), ROCHE (P.), 1974. — Arrière-action des fumures de redressement phosphatées sur divers types de sols de Madagascar. *Agron. Trop.*, XXIX, 5 : 593-606.

VERDADE (F.C.), 1969. — Importance of non symbiotic organisms in the nitrogen economy of tropical soils. « in » : Biology and Ecology of nitrogen, proceedings of a conference, National Academy of Sciences, Washington, D.C. (cité par Van Wambeke, 1971).

VERLIERE (G.), 1967. — Effet de trois sources d'azote sur l'évolution du sol, la nutrition minérale et le rendement du caféier. *Café, Cacao, Thé*, XI, 2 : 139-156.

VERLIERE (G.), 1967 b. — Evolution de la recherche sur la fertilisation en caféiculture en Côte d'Ivoire. Colloque fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 19-25 Nov., I : 803-811.

VERLIERE (G.), 1969. — Un essai d'engrais sur cacaoyers en Côte d'Ivoire. *Café, Cacao, Thé*, XIII, I : 11-33.

VETTORI (L.), 1969. — Métodos de analise do solo. Boletím técnico n° 7. Equipe de Pédologia e Fertilidade do Solo. Rua Jardim Botanico 1.204, Rio de Janeiro.

VICENTE-CHANDLER (J.), CAROCOSTAS (R.), PEARSON (R.W.), ABRUNA (F.), FIGARELLA (J.), SILVA (S.), 1964. — The intensive management of tropical forages in Puerto Rico. Univ. P. Rico Agric. Exp. Station, Rio Pedras, Bull. 187.

VILLACHIA (H.L.), BORMENISZA (E.), AARCA (M.), 1974. — Efecto de la aplicacion de cal, fosforo y zinc en el rendimento y la concentracion del zinc, manganese y hierro en el pasto pangola. *Turrialba*, 24, 2 : 132-140.

VISSER (S.), 1961. — Chemical composition of rain water in Kampala, Uganda, and its relation to meteorological and topographical conditions. *Jour. Geophys. Res.*, 66 : 3759-3765.

VIZIER, 1965. — Etude agropédologique d'emplacements cotonniers au Mayo-Kebi, République du Tchad. Rapport interne ORSTOM-CFDT, 63 p., cité par DABIN, 1969.

VOLKOFF (B.), 1975. — Caracterizacâo dos horizontes de alguns solos ferralíticos do estado da Bahia atravès do seu indice de instabilidade estrutural. *Anais XV Congr. braseileiro ciencia do solo*, : 373-380.

VON HUEXKULL (H.R.), 1972. — La réponse du cocotier au chlorure (de potassium) aux Philippines. *Oléagineux*, 27, 1 : 13-19.

WAIFOR (West African Institute for Oil palm Research), 1960-1961. — Ninth annual Report. : 102-103.

WALCOTT (J.J.), CHAUVIROJ (M.), CHINCHEST (A.), CHOTICHEUY (P.), FERRARIS (R.), NORMAN (B.W.), 1977. — Long term productivity of intensive rice cropping systems on the central plain of Thailand. *Expl. Agric.*, 13, 4 : 305-315.

WALKER (T.W.), ADAMS (A.F.R.), ORCHISTON (H.D.), 1955. — Effect and interactions of molybdenum, calcium and phosphorus on yield and composition of Tr. repens, grown on acid molybdenum responsive soils. *Plant and Soil*, 6, 2 : 201-220.

WALMSLEY (D.), CORNFORTH (I.S.), 1973. — Methods of measuring available nutrients in west indian soils. II Phosphorus. *Plant and soil*, 39 : 93-101.

WARNCKE (D.D.), BARBER (S.A.), 1973. — Ammonium and nitrate uptake by corn (zea Mays L.) as influenced by nitrogen concentration and NH_4/NO_3 ratio. *Agron. J.*, 65 : 950-953.

WARREN (R.G.), BENZIAN (B.), 1959. — High levels of phosphorus and die-back in yellow lupins. *Nature* (London), 184 : 1588.

WARREN (R.G.), COOKE (G.W.), 1965. — Comparisons between methods of measuring soluble phosphorus and potassium in soils used for fertilizers esperiments on sugar beets. « in » Soil Phosphorus (Bull. Minist. Agric. Fish Fd London), 13 : 30-37.

WATANABE (F.S.), OLSEN (S.R.), 1965. — Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and $NaHCO_2$ extracts from soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29, 6 : 677-678.

WATSON (G.A.), 1957. — Nitrogen fixation by Centrosema pubescens. *J. Rubber Res. Inst. Malaya*, 16 : 126-138.

WATSON, 1969. — Water movement in two termite mounds in Rhodesia. *J. Ecol.*, T 57 : 441-451.

WATSON (G.A.), CHIN (T.S.), WONG (P.W.), 1962. — Loose of ammonia by volatilization from surface dressings of urea on hevea cultivation. *J. Rubb. Res. Inst. Malaya.*, 17 : 77-90.

WAUGH (D.L.), MANZANO (A.), 1971. — The correlation of phosphorus response with soil analysis in tall and dwarf wheat varieties in Bolivia. Intern. Symp. Soil Fertility Evaluation (New Delhi), I : 377-382.

WAY, 1850. — 1852. — On the power of soils to absorb manure. *Journ. Roy. Agric. Soc.* 1850 : XI : 373-379 et 1852 : XII : 123-143.

WEAMER (R.M.), FOX (R.H.), DROSDORF (M.), 1975. — Inorganic and organic phosphorus occurence in some highly weathered soils of Puerto-Rico. *Trop. Agric.* (Trin.) 2 : 119-130.

WEIR (C.C.), 1969. — Potassium and magnesium nutrition of Citrus trees. *Trop. Agric.* (Trin.), 46, 2 : 131-136.

WEIR (C.C.), 1966. — The phosphorus and potassium status of some Trinidad Soils. *Trop. Agric.* (Trin.), 43, 4 : 315-321.

WEIR (C.C.), 1972. — Phosphate studies on the Jamaican bauxite soils. *Trop. Agric.* (Trin.), 49 : 89-96.

WEIR (C.C.), JONES (R.L.), 1970. — Spectrophotometric determination of Boron in plant and soil samples. *Trop. Agric.* (Trin.), 47, 3 : 261-264.

WELCH (L.F.), SCOTT (A.D.), 1961. — Availability of non-exchangeable potassium to plants as affected by added ammonium and potassium. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 25 : 102-104.

WESSEL (M.), 1967. — Cacao soil of Nigeria. Segunda conferencia internacional de pesquizas em cacao. Nov. Bahia, Brésil : 417-429.

WESSEL (M.), 1971. — Fertilizer requirements of cacao (Theobroma cacao L.) in South Western Nigeria. Publ. Royal Trop. Inst. Amsterdam, n° 61 ; 104 p.

WICKLANDER (L.), 1954. — Forms of potassium in the soil. Potassium Symposium, Intern. Potash Inst., Bern, : 109-121.

WICKLANDER (L.), GIESECKING (J.E.), 1948. — Exchangeability of adsorbed cations as influenced by the degree of saturation and the nature of the complementary ions with special references to trace concentration. *Soil Sci.*, 66 : 377-384.

WILD (A.), 1971. — The potassium status of soils in the savanna zone of Nigeria. *Exper. Agric.*, 7, 3 : 257-270.

WILD (A.), 1972. — Mineralization of soil nitrogen at a savanna site in Nigeria. *Exper. Agric.*, 8, 2 : 91-97.

WILD (A.), 1972. — Nitrate leaching under bare fallow at a site in Northern Nigeria. *J. Soil Sci.*, 23, 2 : 315-324.

WILD (A.), BABIKER (J.A.), 1976. — The asymetric leaching pattern of nitrate and chloride in a loamy sand under field conditions. *J. Soil Sci.*, 27, 4 : 460-466.

WILLIAMS (J.H.D.), WALKER (I.W.), 1969. — Fractionation of phosphate in a maturity sequence of New Zealand basaltic soil profile. *Soil Sci.*, 107, 3 : 213-219.

WHITE (R.E.), BECKETT (P.H.T.), 1964. — Studies on the phosphate potentials of soils, I. The measurement of phosphate potential. *Plant and soil*, 20, 1 : 1-16.

WHITE (R.O.), NILSON-LEISSNER (G.), TRUMBLE (H.C.), 1955. — Les légumineuses en agriculture. Etudes Agricoles n° 21, FAO, Rome.

WHITEHEAD (D.C.), 1964. — Soil and plant-nutrition aspects of the sulphur cycle. *Soils and fertilizers*, 27, 1 : 1-8.

WILKINSON (G.E.), 1975. — Rainfall characteristics and soil erosion in the rainforest area of western Nigeria. *Expl. Agric.*, 11, 4 : 247-255.

WILLIAMS (J.D.H.), SYERS (J.K.), WALKER (T.W.), 1967. — Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's procedure. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31 : 736-739.

WILLIAMS (E.G.), STEWART (A.B.), 1941. — The colorimetric determination of readily soluble phosphate in soils. *J. Soc. Chem. Ind.*, London, 60 : 291-297.

WILLSON (K.C.), 1969. — The mineral nutrition of tea. *Revue de la potasse,* Berne, Nov. Section 27.

WILSON (A.S.B.), LANSBURY (T.J.), 1958. — Centrosema pubescens : ground cover and forage crop in cleared rain forest in Ghana. *Emp. J. Exp. Agric.*, 26 : 351-364.

WONG YOU CHEONG (Y.), Mc CONAGHY, 1972. — An assessment of indices of available phosphate in tropical basaltic soils using 32 P. *Trop. Agric.* (Trin.) 49, 1 : 81-96.

WU (Y.C.), SU (N.R.), 1965. — Response of pineapple on a latosol to phosphorus, magnesium and differently applied potassium. *J. Agron. Assoc. China* (New Series), 49 : 48-64.

WUTKE (A.C.P.), 1972. — « *in* » Muniz (A.C.), Elementos de pedologia. Chap. 14 « Nitrogénio ». Editora Poligono, Sâo Paulo, 459 p.

YANG (P.S.), PAO (P.T.), 1962. — Studies on the effect of Potash on banana. *Rev. Potasse,* Section 27 : 27.

YOUNGE (O.R.), PLUCKNETT (D.L.), 1966. — Quenching the high phosphorus fixation of Hawaian latosols. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30, 5 : 653-655.

YUAN (T.L.), 1960. — Soil Acidity and Al^{+++} status as affected by some neutral salts. Proc. 7e Intern. Cong. Soil Sci. (Madison), II, 21 : 152-160.

YUAN (T.L.), 1963. — Some relations among hydrogen, aluminium and pH in solution and soil systems. *Soil Sci.*, 95, 3 : 155-163.

YUAN (T.L.), 1974. — A double buffer method for the determination of lime requirement of acid soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, 3 : 437-440.

ZAJIC (J.E.), 1969. — Microbial biogeochemistry. Edit. Academic Press, New York : 156-168.

TABLE DES MATIERES

Pages

AVANT-PROPOS I

ABSTRACT III

INTRODUCTION 1

CHAPITRE PREMIER : *L'environnement des sols ferrallitiques et les contraintes qui en découlent* 3

1. *Localisation des sols ferrallitiques* 3

2. *Contraintes climatiques* 3
   2.1. La température 4
   2.2. L'ensoleillement 4
   2.3. La pluviosité et la répartition des pluies dans l'année 5
   2.4. Les facteurs climatiques et les risques d'érosion. L'agressivité des pluies ... 5
   2.5. L'agressivité générale du climat 6

3. *La topographie et la susceptibilité des sols à l'érosion* 6
   3.1. Le micro-relief 7
   3.2. Le relief général 7
   3.3. La pente et les risques d'érosion 8
   3.4. Limitations agricoles imposées par la pente 8

4. *Conclusion : l'érosion et sa prévention* 10

CHAPITRE DEUX : *La profondeur du sol, la différenciation des horizons pédologiques et la pénétration des racines* 13

1. *La profondeur des sols ferrallitiques, le sol utile et le profil cultural* 13

2. *La compacité de l'horizon sous-jacent* 13

3. *Les sols à dynamique superficielle de l'eau* 14

4. *Présence d'un horizon hydromorphe à faible profondeur* 15

5. *Présence d'une nappe de gravats* 15
   5.1. Epaisseur de l'horizon graveleux 15
   5.2. Profondeur du toit de l'horizon graveleux 16
   5.3. Densité des gravillons 16
   5.4. Le sous-solage des gravillons et l'effet sur les cultures 17
   5.5. Récapitulation 17

6. *Horizons indurés, carapace, cuirasse* 18

7. *Présence d'un horizon d'« étrangement chimique ». La barrière chimique* 18

8. *Conclusion : limitations culturales en relation avec la profondeur du sol utile* ... 19

CHAPITRE TROIS : *Les constituants du sol - Eléments grossiers et terre fine* 23

1. *Définition* 23
   1.1. Les constituants grossiers 23
   1.2. La terre fine et la texture du sol 24
2. *La charge du sol en éléments grossiers et les contraintes qu'elle introduit* 25
   2.1. Limitations agricoles pour les éléments grossiers situés en surface 25
   2.2. Limitations agricoles pour les éléments grossiers situés en profondeur 26
3. *Les textures et les principales plantes cultivées* 27
4. *Les propriétés des sols induites ou favorisées par la texture* 28
   4.1. La compacité 28
   4.2. La perméabilité et le drainage 28
   4.3. Les réserves en eau utile et le bilan hydrique 28
   4.4. La matière organique, le complexe d'échange et les bases échangeables 29
5. *Conclusion - Essai de synthèse - Texture et limitations culturales* 29

CHAPITRE QUATRE : *La structure et la stabilité structurale* 31

1. *Les indices structuraux et leurs méthodes d'étude* 31
   1.1. Méthode « américaine » 31
   1.2. Méthode de Hénin 31
   1.3. Méthodes dérivées de la méthode de Hénin 32
   1.4. Etat structural du sol - Indice Σ 33
   1.5. Méthode de Dabin 33
   1.6. Autres méthodes 34
2. *Les facteurs de la structure* 34
   2.1. Rôle nul ou faible du calcium 34
   2.2. Rôle du fer 34
   2.3. Rôle de la matière organique 35
   2.4. Rôle de l'argile 36
   2.5. Récapitulation 36
   2.6. Action des racines des plantes 36
3. *Les deux phases de l'agrégation* 37
4. *Les variations de l'état structural du sol* 38
   4.1. Les variations saisonnières 38
   4.2. Les variations induites par la culture 39
5. *Conséquences de la dégradation de la structure dans les sols cultivés* 39
   5.1. Une diminution de la perméabilité 40
   5.2. Un accroissement de l'érosion superficielle 40
   5.3. Une difficulté pour la germination et l'enracinement des plantes 40
6. *Amélioration de la structure* 41
7. *Conclusion* 42

CHAPITRE CINQ : *La porosité (compacité, densité apparente, densité réelle)* 43

1. *Généralités* 43
   1.1. Liaisons entre porosité, compacité, densité apparente et densité réelle 43
   1.2. Porosité totale, macroporosité, microporosité 44
   1.3. Porosité structurale et porosité mottière 45
   1.4. Porosité fermée et porosité ouverte 45
2. *Les facteurs de la porosité* 45
   2.1. La structure 45
   2.2. La texture 46
   2.3. Le pédo-climat 46

3. *Caractères généraux de la porosité des sols ferrallitiques* 48
3.1. La porosité totale 48
3.2. Valeurs de la porosité dans quelques sols ferrallitiques 50
4. *La porosité, la mise en culture et les façons culturales* 51
4.1. Diminution de la porosité par la culture 51
4.2. Amélioration temporaire de la porosité par le labour 53
4.3. La matière organique et la porosité 54
4.4. La jachère, la prairie paturée et la porosité 54
5. *Limitations agricoles en fonction de la porosité du sol* 55
6. *Conclusion* 56

CHAPITRE SIX : *Les propriétés hydriques* 57
1. *Les méthodes d'étude* 57
1.1. L'humidité des sols 57
1.2. Tension d'humidité 58
1.3. Définition des caractéristiques hydriques 58
2. *Les principales caractéristiques hydriques des sols ferrallitiques* 59
2.1. Le point de flétrissement 59
2.2. La capacité au champ 59
2.3. L'eau utile 62
3. *Valeurs de l'eau utile et disponibilités pour les plantes* 63
3.1. Quelques valeurs de l'eau utile 63
3.2. Disponibilité de l'eau utile pour les plantes 67
3.3. Evaluation du stock d'eau utile du sol (eau disponible pour les plantes) ... 68
3.4. L'eau utile et les besoins des plantes 68
4. *La dynamique de l'eau dans le sol* 69
4.1. Climat : précipitation - évapotranspiration 69
4.2. La perméabilité 70
4.3. Le drainage 76
4.4. Bilan hydrique des sols 78
5. *Le drainage oblique* 80
6. *Pratiques agronomiques d'économie de l'eau* 81
7. *Limitations agricoles dues à un drainage insuffisant* 82
8. *Conclusion* 83

CHAPITRE SEPT : *Origine des éléments nécessaires aux plantes* 85
1. *La roche-mère* 85
1.1. Teneurs du sol en nutriments et richesse de la roche-mère en ces éléments . 85
1.2. Devenir des nutriments minéraux au cours de la pédogenèse ferrallitique .. 86
1.3. Roche-mère, pédogenèse ferrallitique, facteurs climatiques et teneurs du sol en nutriments 88
1.4. Facteurs agissant en sens inverse de l'évolution ferrallitique 90
1.5. En guise de conclusion 92
2. *La végétation* 92
2.1. Quantité globale de nutriments contenus dans la végétation 92
2.2. Modification des caractéristiques du sol par les éléments chimiques contenus dans la végétation 94
3. *L'atmosphère* 96
3.1. L'azote : azote apporté par la pluie ; azote fixé de l'air par les micro-organismes ; gains globaux d'azote par le sol 96
3.2. Le soufre 100

3.3. Le chlore 101
3.4. Les cations alcalins et alcalino-terreux 101

4. *Conclusion* 104

CHAPITRE HUIT : *Formes des éléments chimiques du sol en relation avec la fertilité et méthodes d'analyse* 105

1. *Introduction* 105

2. *Les formes de l'azote* 106
2.1. Généralités 106
2.2. Méthodes d'analyse 106
2.3. Teneurs en azote des sols ferrallitiques 109
2.4. Récapitulation 110

3. *Les formes du soufre* 111
3.1. Formes du soufre dans le sol 111
3.2. Méthodes d'analyse 111
3.3. Teneurs en soufre des sols ferrallitiques 111

4. *Le phosphore* 113
4.1. Généralités 113
4.2. Phosphore total 113
4.3. Phosphore assimilable 113
4.4. Procédés de fractionnement du phosphore du sol 115
4.5. Phosphore extrait à l'eau et par les résines échangeuses d'anions 120
4.6. Phosphore labile isotopiquement diluable 121
4.7. Conception dynamique de l'analyse de phosphore du sol 122
4.8. Comparaison entre différentes méthodes de mesure du phosphore assimilable 124

5. *Les formes du potassium* 126
5.1. Généralités 126
5.2. Potassium assimilable, potassium difficilement échangeable (potassium « fixé », potassium réserve agronomique dit « total ») 127
5.3. Méthodes de détermination du potassium du sol 128
5.4. Discussion : comparaison entre les différentes méthodes de mesure du potassium du sol 133

6. *Les formes du calcium et du magnésium* 137
6.1. Calcium et magnésium échangeables 137
6.2. Calcium et magnésium totaux et le problème des réserves calciques et magnésiennes 140
6.3. Méthodes d'analyse du calcium et du magnésium 141
6.4. Méthodes permettant d'estimer calcium et magnésium assimilables à terme 146
6.5. Récapitulation 147

7. *Les formes de l'aluminium* 148
7.1. Généralités 148
7.2. Aluminium total 148
7.3. Aluminium libre 149
7.4. Aluminium extractible 149
7.5. Aluminium échangeable 150
7.6. Aluminium complexé par la matière organique 152
7.7. Aluminium échangeable et évaluation des besoins en chaux des sols 152

8. *Les formes des oligo-éléments* 153
8.1. Méthodes analytiques 153
8.2. Formes des oligo-éléments : B, Cu, Mo, Mn, Zn 154

CHAPITRE NEUF : *Dynamique des anions majeurs : azote, soufre, phosphore* 161

1. *Introduction* 161

2. *Dynamique de l'azote et alimentation azotée des plantes* 162
2.1. Généralités 162
2.2. Vitesse et taux de minéralisation des matières organiques 162
2.3. Ammonification des substances organiques du sol 165
2.4. La nitrification 166
2.5. Pertes d'azote ammoniacal par lixiviation ou volatilisation 169
2.6. Pertes d'azote par dénitrification 169
2.7. Entraînement d'azote par lixiviation des nitrates 170
2.8. Discussion : peut-on diminuer les pertes en nitrates 172

3. *Dynamique du soufre* 174
3.1. Généralités 174
3.2. Le soufre et la matière organique 175
3.3. Fixation du soufre des sulfates par les colloïdes du sol 176
3.4. Lixiviation des sulfates du sol 178
3.5. Discussion : besoin en soufre des plantes 179

4. *Dynamique du phosphore* 180
4.1. Généralités 180
4.2. Faible lixiviation du phosphore 180
4.3. La rétention du phosphore par le sol et le pouvoir fixateur des sols ferrallitiques 181
4.4. La rétrogradation du phosphore 182
4.5. Nature de la liaison entre anion phosphate et oxydes-hydroxydes de fer et d'alumine 184
4.6. Le rôle des substances organiques dans la rétrogradation 186
4.7. Réversibilité de la rétrogradation du phosphore 187
4.8. Les facteurs de LARSEN et la dynamique du phosphore des sols 189
4.9. Toxicité du phosphore apporté au sol. Que faut-il en penser ? 189
4.10. Le phosphore et la capacité d'échange des sols à forte charge d'hydroxydes de fer colloïdal 191
4.11. Discussion 192

CHAPITRE DIX : *Dynamique des cations majeurs, potassium calcium, magnésium, de l'aluminium et de certains oligo-éléments (bore, cuivre manganèse, molybdène, zinc et chlore)* 193

1. *Dynamique du potassium* 193
1.1. Introduction 193
1.2. Le potassium échangeable et sa fixation sur le complexe absorbant 194
1.3. La rétrogradation du potassium 196
1.4. La régénération du potassium échangeable par le sol 198
1.5. Lixiviation du potassium dans les sols 201
1.6. Facteurs qui interviennent dans la lixiviation des engrais potassiques 203
1.7. Pratiques agronomiques destinées à réduire la lixiviation du potassium 205
1.8. Discussion et conclusion 205

2. *Dynamique du calcium et du magnésium* 206
2.1. Généralités : les divers aspects de la dynamique du calcium et du magnésium 206
2.2. Susceptibilité à la lixiviation du calcium et du magnésium 207
2.3. Mécanisme de la lixiviation 209
2.4. Facteurs de la lixiviation 211
2.5. Discussion 217

3. *Dynamique de l'aluminium (l'aluminium échangeable)* 218
3.1. Généralités 218
3.2. Facteurs d'apparition de l'aluminium échangeable 218
3.3. L'aluminium échangeable et les propriétés du sol 220
3.4. La barrière chimique 222
3.5. Discussion : conséquence de la présence de l'aluminium échangeable 223

4. *Dynamique des oligo-éléments : molybdène, bore, manganèse, cuivre, zinc, chlore* 224
4.1. Introduction 224
4.2. Rôle du pH 224
4.3. Complexation par la matière organique 228
4.4. Rétention et libération par les colloïdes minéraux 229
4.5. Apparition de conditions réductrices 231
4.6. La lixiviation 231
4.7. L'érosion 231
4.8. Action des amendements calco-magnésiens 231
4.9. Les engrais minéraux et l'assimilabilité des oligo-éléments 232
4.10. Le chlore : un cas particulier 233
4.11. Discussion : récapitulation 235

CHAPITRE ONZE : *Les équilibres entre les éléments chimiques du sol : antagonismes - synergies - interactions* 237

1. *Introduction* 237

2. *Conditions de l'étude* 237

3. *Equilibres entre anions majeurs* 240
3.1. Equilibre carbone-azote 240
3.2. Equilibre azote-phosphore 240
3.3. Equilibre azote-soufre et interactions azote-soufre 242
3.4. Interaction positive soufre-phosphore ou antagonisme ? 243
3.5. Equilibre phosphore-silice 243

4. *Equilibres entre cations majeurs* 245
4.1. Antagonisme calcium-magnésium. Rapport Ca/Mg 245
4.2. Antagonisme magnésium-potassium et rapport magnésium-potassium 247
4.3. Equilibre calcium-potassium 249
4.4. Equilibre global calcium-magnésium-potassium. Le rapport Ca + Mg/K 250
4.5. Balances cationiques dans les sols ferrallitiques 251

5. *Equilibres entre cations et anions* 252
5.1. Interaction vraie calcium-phosphore ou synergie apparente ? 252
5.2. Synergie magnésium-phosphore 253
5.3. Effet synergétique entre calcium et magnésium et l'azote du sol 253
5.4. Equilibre potassium-azote 254
5.5. Equilibre phosphore-potassium - Synergie ou antagonisme ? 255

6. *Equilibres entre éléments majeurs et oligo-éléments* 255
6.1. Rôle du pH 255
6.2. Antagonisme calcium-aluminium 255
6.3. Antagonisme du calcium et du magnésium avec le manganèse 256
6.4. Synergie calcium-molybdène 256
6.5. Antagonisme potassium-manganèse 257
6.6. Antagonisme potassium-molybdène 257
6.7. Antagonisme ou synergie potassium-fer ? 258
6.8. Synergie ou antagonisme potassium-chlore ? 258
6.9. Antagonismes entre les cations majeurs — calcium, magnésium et potassium — et certains oligo-éléments (cuivre, zinc principalement) 259

6.10. Antagonisme potassium-bore 260
6.11. Antagonisme azote-bore 260
6.12. Synergie phosphore-manganèse 261
6.13. Antagonisme ou synergie phosphore-aluminium 262
6.14. Synergie phosphore-molybdène et antagonisme soufre-molybdène ou compétition entre ces ions ? 263
6.15. Antagonisme entre le phosphore et certains oligo-éléments (bore, cuivre, zinc) 263
7. *Equilibres entre oligo-éléments* 264
7.1. Synergie aluminium-manganèse et antagonisme aluminium-cuivre 264
7.2. Antagonisme fer-manganèse 264
7.3. Antagonisme molybdène-manganèse 265
7.4. Antagonisme zinc-cuivre-fer 265
7.5. Antagonisme zinc-arsenic 266
7.6. Antagonisme zinc-molybdène ? 266
7.7. Antagonisme cuivre-molybdène 267
8. *Conclusion* 267

CHAPITRE DOUZE : *Les teneurs du sol en éléments anions et cations, compatibles avec la culture (valeurs-critiques, échelles de fertilité et limitations agricoles)* 271
1. *Introduction* 271
2. *Azote* 271
2.1. Généralités 271
2.2. Teneurs en matières organiques et limitations agricoles qui en découlent .. 272
2.3. Teneurs en azote total du sol et échelles de fertilité 273
2.4. Discussion : les besoins des plantes cultivées et la fourniture d'azote par le sol 276
3. *Soufre* 278
3.1. Généralités 278
3.2. Teneurs en soufre compatibles avec les cultures 279
3.3. Discussion 280
4. *Phosphore* 281
4.1. Généralités 281
4.2. Evaluation du potentiel en phosphore du sol par des procédés analytiques . 281
4.3. Discussion 286
5. *Potassium* 287
5.1. Généralités 287
5.2. Seuil critique relatif (limitation forte à moyenne) 288
5.3. Seuil critique absolu 289
5.4. Limitations agricoles dues au potassium échangeable 290
5.5. Quelques échelles de fertilité pour le potassium échangeable 291
5.6. Discussion : potassium devenant assimilable à terme 292
6. *Magnésium, calcium et somme des bases échangeables* 293
6.1. Généralités 293
6.2. Seuils de carence et de déficience pour le magnésium 294
6.3. Teneurs-limite et teneurs optimales en calcium 296
6.4. Echelles de fertilité faisant intervenir le calcium et le magnésium 298
6.5. Discussion 303
7. *Aluminium échangeable* 303
7.1. Généralités 303
7.2. Toxicité aluminique et valeurs absolues de l'aluminium échangeable 303
7.3. Toxicité aluminique et complexe absorbant. Seuils de toxicité 305
7.4. Discussion 308

8. *Oligo-éléments* 308
8.1. Cuivre 308
8.2. Zinc 311
8.3. Manganèse 313
8.4. Molybdène 315
8.5. Bore 317
9. *Un facteur d'appréciation de la fertilité : le pH* 320
9.1. Définition 320
9.2. pH et saturation en bases du sol 321
9.3. Le pH et quelques propriétés des sols 322
9.4. Le pH du sol et les plantes cultivées 324
10. *Conclusion* 327

CHAPITRE TREIZE : *Conclusion générale* 329
1. *Généralités* 329
2. *Les insuffisances* 329
2.1. Les connaissances incomplètes 330
2.2. L'évolution des sols sous culture 330
2.3. Les procédés culturaux 331
3. *Les progrès des connaissances agronomiques* 332
3.1. Evolution des connaissances 332
3.2. Diffusion des connaissances 333
4. *Les caractéristiques physique et chimique des sols ferrallitiques et la mise en valeur agricole* 334
4.1. Les caractéristiques favorables à la mise en valeur agricole 334
4.2. Les caractéristiques défavorables à la mise en valeur agricole 336
5. *Hiérarchisation des divers facteurs de la fertilité des sols ferrallitiques* 338

BIBLIOGRAPHIE 341

Achevé d'imprimer
sur les presses de COPEDITH
7, rue des Ardennes
75019 PARIS

Octobre 1982
Dépôt légal n° 4012

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Direction Générale : 24, rue Bayard, 75008 PARIS
Service des Editions,
70-74, route d'Aulnay, 93140 BONDY

ORSTOM EDITEUR
Imprimeur COPEDITH
Dépôt légal n° 4012
3e trimestre 1982