

COMITE DES SOLS TROPICAUX
COMMITTEE ON TROPICAL SOILS
Londres 8-12 juin 1970

ESSAI DE SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES ACQUISES
SUR LES FACTEURS DE FERTILITÉ DES SOLS
EN AFRIQUE INTERTROPICALE FRANCOPHONE

Jean BOYER
Ingenieur agronome I. N. A.
Directeur de recherches à l'O.R.S.T.O.M.

ACKNOWLEDGEMENT

This report was prepared under a contract between the Agency for International Development and the National Academy of Sciences. The findings and recommendations express the views of the individual authors, and of the members of the study group assembled by the National Academy of Sciences and are not to be construed as official statements by either the National Academy of Sciences of the Agency for International Development.

C O M I T E D E S S O L S T R O P I C A U X

C O M M I T T E E O N T R O P I C A L S O I L S

LONDRES 14-18 JUIN 1970

-oOo-

ESSAI DE SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES ACQUISES

SUR LES FACTEURS DE FERTILITÉ DES SOLS

EN AFRIQUE INTERTROPICALE FRANCOPHONE

-oOo-

Jean BOYER

Ingénieur Agronome I.N.A.

Directeur de Recherches à I.D.R.S.T.O.M.

ESSAI DE SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES ACQUISES
SUR LA FERTILITÉ DES SOLS
EN AFRIQUE TROPICALE FRANCOPHONE

- ENGLISH SUMMARY -

INTRODUCTION

SOIL SURVEY OF FRENCH SPEAKING TROPICAL

1. Soil formation factors

1.1. Climate and vegetation

Climates range from dry and semi-humid with a three-month dry season in the north to an all-year humid season in the equatorial area. Consequently, the vegetation varies from herbaceous savanna to equatorial forest.

1.2. Geology and rocks

Precambrian forms the main part of geological layers except in basins (Tchad basin, Niger central delta, Congo basin) and on seashore where sediments are often tertiary and quaternary.

1.3. Geomorphology

West and Central Africa is made from a sequence of depressed basins and horizontal plateaus ranging from 300-400 m to 1400 m

2. Main types of soils

2.1. Sub-arid soils: they are merely mentioned because the main part of these soils is outside the area under study.

2.2. Ferruginous tropical soils

American classification: psamments. These soils form the main agricultural area in semi-humid area (peanuts, millet, cotton).

2.3. Vertisols

These soils do not occur often in French speaking Africa; they are found only where they are on a calcareous-manganesiferous parent material.

They are seldom cultivated.

2.4. Electric brown soils

American classification: Xero-crepts, Usto-crepts.

They occur mainly in semi-humid areas on alkaline parent material and are used for cultivation. They exist in humid areas, where they are regarded as the first stage of ferrallitic soils. They are cultivated in cocoa, coffee, and other tree crops.

2.5. Ferrallitic soils

These soils are found in the major part of equatorial and humid tropical areas.

The parent material may be any rocks.

They have an oxic B horizon, sometimes crumbly but often with duripan, fragipan or gravel layer.

They support almost every type of cultivation.

They are classified in:

- weakly unsaturated ferrallitic soils (inceptisols),
- medium unsaturated ferrallitic soils (oxisols p.p.),
- strongly unsaturated ferrallitic soils (ultisols, oxisols)

Andosols (Andepts)

they exist only in volcanic areas of Cameroun, are poorly extended, but are very fertile.

Hydromorphic soils

including peaty soils (histosols)

semi-organic hydromorphic soils

mineral hydromorphic soils

banana is the major crop cultivated on these soils.

Lithosols

generally not cultivated.

CHAPTER I

ROOT PENETRATION AND SOIL PHYSICAL CHARACTERISTICS

Four factors inhibiting good root penetration were studied in French-speaking tropical Africa.

1. a strong difference between the two upper horizons; Solution: tillage and subsoiling.
There is no solution in soils including an Oxyc B horizon formed with fragipan, duripan, or ferruginous gravels.
2. a fine texture mainly composed with silt and fine sand (Ferruginous tropical soils)
Solution: plowing.
3. a bad structure:
Ferruginous tropical soils; Solution: Tillage associated with green manure. Vertisols: Solution: fallow.
4. a soil porosity less than 40%
Ferruginous tropical soils and ferrallitic soils; Solution: tillage associated with green manure.
Vertisols: Solution: natural or artificial fallow.

Soil scientists working in French-speaking tropical Africa often recommend plowing.

CHAPTER II

SOIL NITROGEN EVOLUTION AND SOIL ORGANISMS FIXING OR TRANSFORMING NITROGEN

- I. Origin of soil nitrogen.
 - 1.1 No specific studies were made in French-speaking Africa concerning the nitrogen content in rain.
 - 1.2 Aerobic fixation by bacteria:
Much is known about Azobacter chroococcum and Beijerinckia indica, (soil types, pH, liming and calcium effects), but more data are needed for confirmation.
 - 1.3 Fixation by algae: no precise data, but this fixation does occur.
 - 1.4 Symbiotic fixation: Rizobium of peanut and soya was studied mainly concerning its relations to soil pH and the soil content of molybdenum.
 - 1.5 Anaerobic fixation by Clostridium was never studied.
- II. Amount of atmospheric nitrogen fixed by soil organisms:
Data for peanut Rhizobium in West Africa show that about 100 kg. of N is fixed per hectare.
No data is available for other organisms.
- III. Ammonification and nitrification.
Ammonification is less affected by dry conditions and low pH than is nitrification.
Nitrification has a rythmic course throughout the year: it increases markedly during the first months of the humid season and is very weak during the dry season, even in equatorial areas where the dry season is slightly wet.
- IV. We know almost nothing about denitrification in tropical soils; some experiments are now under study in Senegal (rice fields).

CHAPTER III

NITROGEN AND CULTIVATED PLANTS

1. The response of crops to nitrogen fertilizers is usually good and more or less proportional to the amount of nitrogen.
2. There is positive correlation between soil pH, amount of soil nitrogen and crop yields.
3. Among nitrogen fertilizers used or experimented (urea, cyanamid, ammonium nitrate, calcium nitrate, ammonium phosphate, ammonium sulfate), ammonium sulfate is the most widely used because many soils are sulfur deficient. When this deficiency is corrected (or does exist), ammonium sulfate, ammonium phosphate and urea have the same effect on crops as long as the amount of nitrogen is the same. Nitrates are seldom used and seem to have less effect than other fertilizers in some cases.
4. Every nitrogen fertilizer has an acidifying effect on soil, but ammonium sulfate has the most marked acidifying effect. This acidification is reported to be caused mainly by cation leaching in combination with NO_3^- (and SO_4^{--}
A lesser reduction of the soil pH occurs in fields under cultivation without the application of nitrogen fertilizer.
5. Fallow is the current remedy used in native agriculture, but natural tricalcium phosphates (1 ton/Ha) prevent the reduction of soil pH in Senegal.

CHAPTER IV

SOIL pH AND CROP YIELDS

I. There is a relation between soil pH and crop yields.

The soil pH most suitable for many cultivated plants is between 6 and 7.

II. High pH (above 7.5) depresses yields due to excess levels of exchangeable cations, especially sodium.

Low pH (less than 5.5) tends to reduce the yield of various crops:

- Weak activity or inhibition of soil bacteria.
- Manganese and aluminium toxicity (Ferrallitic soils)
- Phosphorus fixation on iron and aluminium (Ferrallitic soils).
- Unavailability of some oligo-elements.

CHAPTER V

LIMING AND Ca-Mg REQUIREMENT

1. Except in banana plantations, few liming experiments have been carried out in French-speaking tropical Africa because liming was regarded as unnecessary and did not sufficiently improve crop yield to pay its high cost.
2. For a couple of years, the following was observed:
 - a great rate of Ca - Mg leaching as well as Ca - Mg removal by crops.
 - effect upon cultivated plants of low pH (death of Rhizobium manganic toxicity) or a low level of calcium in the soil. (Ferruginous tropical soils of Senegal, Ferrallitic soils of Congo-Brazzaville).
3. Disadvantages of liming seem to have been overestimated. Nevertheless, it was noted that occurrences of copper and zinc deficiencies in banana plantations were caused to a greater extent by a rapid rise in the soil pH than by a single lime effect.
4. The amount of lime per hectare seems to be very high in order to counterbalance calcium-magnesium leaching and pH lowering.
5. Liming has a favorable effect on the activity of soil bacteria.

In conclusion, liming is very poorly used in French-Speaking Africa: long-term fallow is replacing liming in native agriculture.

CHAPTER VI

POTASSIUM IN TROPICAL SOILS AND PROBLEM OF POTASSIUM DEFICIENCY

1. Soil Scientists showed two potassium deficiency levels in soil:
 - less than 0.1 milliequivalent of exchangeable K/100 g of soil.
 - exchangeable K less than 2% of the sum of exchangeable cations.

It has been shown that $\frac{Mg}{K}$ and $\frac{Ca+Mg}{K}$ equilibria are very important in tropical soils.

Very often the equilibria

$$3 \text{ to } 4 < \frac{Mg}{K} < 25$$

$$12 \text{ or } 18 < \frac{Mg+Ca}{K} < 40 \text{ to } 50$$

are convenient.

2. Many sandy ferrallitic soils (oxisols) are potassium deficient (Ivory Coast, Cameroun, Republique Centrafricaine).

Ferrugineous tropical soils in their natural state are seldom potassium deficient.

Potassium deficiencies can appear in every soil after four to five years of cultivation.

Usually natural fallow (for at least two years) restores a sufficient level of exchangeable potassium.

3. Exchangeable potassium is susceptible to leaching: losses due to leaching under continuous cultivation were estimated at 11-20 Kg/Ha per year under various crops in Senegal.

These losses are very high after a fertilization with potassium chloride in banana plantations in Ivory Coast (the rate of one-year leaching is 50 to 60% of the annual K fertilizer applied to soil).

4. The effect on crops of the different forms of potassium fertilizers is similar (potassium chloride, potassium sulfate, potassium metaphosphate).

An acidification effect of Cl^- and SO_4^{--} on soil has been pointed out, but many scientists believe that it is rather weak.

5. No specific studies were made regarding K availability to plants in relation to the type of clay.

CHAPTER VII

PHOSPHORUS IN TROPICAL SOILS

-Many tropical soils have a large deficiency in phosphorus-

- I. All the forms of soil phosphorus, according to CHANG and JACKSON exist in French-speaking Africa.

P-Ca and P-Al (the complexing of P and Ca, and P and Al) form the major part of soil phosphorus in weak by acidic soils.

(Vertisols, sols bruns Eutrophes, sols ferrugineux tropicaux).

P-Fe is very important in ferrallitic soils (chiefly oxisols).

- II. In order to estimate soil fertility due to phosphorus, French scientists used successively in tropical soils:

-amount of total P_2O_5

-value of ratio $\frac{\text{total N}}{\text{total } P_2O_5}$

-the amount of available phosphorus according to Olsen (P-Ca+P-Al+P-organic matter) is still under study.

Many levels were established concerning the amount of phosphorus in the soil as related to soil fertility.

- III. Interaction of phosphorus with other soil elements; some interactions were found.

P-S Ferralitic soils (rice under dry cultivation)

P-Mg Ferralitic soils (banana trees)

P-K Sandy soils (coconut trees)

Ferrugineous tropical soils (peanuts)

P-K-Mg

Ferralitic soils (cocoa trees)

- IV. Phosphorus is not affected to any great extent by leaching but is strongly fixed by iron (unavailable phosphorus) mainly in ferralitic soils (oxisols).

- V. Phosphate fertilizers

In semi-humid areas soluble forms of phosphate (monocalcic, bicalcic, phosphate, ammonium phosphate) are more efficient than rock tricalcium phosphates and slags.

Rock phosphates can be used for improving soil phosphorus and calcium levels in combination with green manure.

In humid tropical and equatorial areas, large amounts of natural phosphate are used in banana plantations; these phosphate are slowly fixed by soil iron. Nevertheless soluble forms of phosphate have a quicker action than rock phosphate even in humid areas.

The residual effect of phosphate fertilizers is important for every form of phosphate but it does not exceed two years.

CHAPTER VIII

SOIL SULPHUR AND SULPHUR DEFICIENCIES

- I. Many soils of French-speaking tropical Africa have sulphur deficiencies for cotton, peanut, coffee, trees,

Savanna soils are more affected than forest soils, but deficiencies decrease naturally after some years of cultivation.

There is insufficient data regarding soil sulphur contents: according to a new method of analysis (now insufficiently experimented) the usual rate of sulphur in soils would be about 1/10 of the nitrogen content.

- II. Sulphur deficiencies can be corrected with ammonium sulfate using a ratio of N/S=2.

The sulphur needs of peanuts are estimated at 6 Kg/Ha per year.

- III. Every form of sulphur has a similar effect as a fertilizer: sulfite, sulfate, superphosphate, mineral sulphur.

- IV. Elemental sulphur is quickly changed to sulfate in soils. Sulphur leaching is fairly uniform (cultivated fields, natural fallow, clean-weeding fallow) and is estimated in Senegal at about 10 Kg/Ha/year.

CHAPTER IX

MINOR AND OLIGO-ELEMENTS

Various studies have been carried out on boron, molybdenum, copper, zinc, manganese.

- I. **BORON:** Deficiencies occur on oil-palm trees when the boron content is less than 0.2-0.1 ppm (sandy ferrallitic soil, Ivory Coast). Other boron deficiencies were seen on cotton bush and banana trees.
- II. **MOLYBDENUM:** This element is necessary to peanut rhizobium. One deficiency was pointed out in northern part of Senegal.
- III. **COPPER AND ZINC:** Deficiencies do not exist in natural soils but appear after liming (banana trees-histosols-Ivory Coast).
- IV. **MANGANESE:** Deficiency is rather rare, but toxicities can damage crops of cotton (ferrallitic soils in Congo Brazzaville and Ivory Coast and vertisols in Tchad) when pH is lower than 4.5 (Ferrallitic soils in Congo Brazzaville).

Effects of liming on pH level increase (or let appear) boron, copper and zinc deficiencies and correct manganese toxicity.

Boron and molybdenum deficiencies are easily corrected with small doses of these elements when applied to soil.

Some interactions between oligo-elements and other soil elements were found (B-K, Mo-Ca, Mn-Ca, Cu-organic matter) but they have not been well studied.

CHAPTER X

SOIL ALUMINIUM, IRON AND SILICA IN RELATION TO CULTIVATED PLANTS

- I. ALUMINIUM: Only a small number of incidences of Al toxicity in crops were displayed, but Al toxicity can occur simultaneously with Mn toxicity. These two toxicities were probably confused.
- II. IRON: Large amounts of this element always exist in the soils of Africa but little is known of its importance for cultivated plants.

Fe⁺⁺ probably damaged crops in wet rice fields in Southern part of Senegal.
Soil iron plays a prominent role in phosphorus fixation and iron hydroxides affect ferrallitic soil structure (Congo Brazzaville).
A positive interaction Fe-K was displayed in coffee trees.
- III. SILICA: No precise data regarding the role of silica in plant breeding are available. However, this is an important aspect.

CHAPTER XI

EVOLUTION OF SOILS UNDER CULTIVATION

1. Erosion effects are very important in French-speaking tropical Africa (runoff and soil losses), concerning mainly clay, silt, fine sand and organic matter after clearing natural vegetation and in over-cultivated fields.

Adequate plowing reduces the erosion levels that is found with native cultivation.

2. Soil humidity: This is rarely studied with regard to modifications caused by clearing natural vegetation; several studies have been made concerning the needs of plants in relation to green-cover or irrigation requirements.

3. Organic matter: important losses of organic matter occur during the first two years of cultivation (40 to 50% of the previous amount in South Senegal). During the following years, the level of organic matter becomes more or less stable.

The most important problem is stabilization at a level available for cultivated plants; it seems possible to obtain it, mainly by turning under straw and roots of cereals and also by short-stage fallows.

4. Exchangeable bases and pH.

The level of exchangeable bases (mainly calcium) and the pH value decrease quickly in fields under cultivation; this decrease is due to leaching and removal of bases by crops.

Efficiency of long-term fallows is good in restoring soil capabilities (native agriculture). The application of natural tricalcium phosphate (1 ton per hectare every four years) prevents a decrease in soil pH and counterbalances calcium losses (sandy ferruginous soil in Senegal).

5. Evolution of physical soil characteristics.

Structure is a primary concern; cultivation processes destroy soil structure quicker in ferruginous tropical soils and vertisols than in ferrallic soils and at the same time destroy organic matter. Fallow is very efficient in restoring structure but it requires a long time (2 to 4 times the period under cultivation).

Other processes studied are:

- plowing under crop residues (cereal straws and stumps).
- rotation of crops including a major part of graminaceous plants.

Liming and green-pasture effects were scarcely tested.

6. Comparison between fallow and green-manure:

Green manure in combination with mineral fertilizers and plowing can possibly replace natural long-term fallow.

However, fallow will probably continue to be necessary in various cases despite its disadvantages.

S O M M A I R E

=====

INTRODUCTION : LES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS D'AFRIQUE FRANCOPHONE

1 - LES FACTEURS DE FORMATION DES SOLS	p.	I
1.1. Climat et végétation	p.	I
1.2. Géologie	p.	III
1.3. Géomorphologie	p.	V
2 - LES GRANDS TYPES DE SOLS	p.	VI
2.1. Sols subarides	p.	VI
2.2. Sols ferrugineux tropicaux	p.	VI
2.3. Vertisols	p.	VIII
2.4. Sols bruns eutrophes	p.	X
2.5. Sols ferrallitiques	p.	XI
2.6. Andosols	p.	XIV
2.7. Solonetz solodisés	p.	XV
2.8. Sols hydromorphes	p.	XV
2.9. Sols peu évolués	p.	XVII

CHAPITRE I : LA PENETRATION DES RACINES ET LES RENDEMENTS DES CULTURES EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

1 - LA DIFFERENCIATION DES HORIZONS PEDOLOGIQUES	p.	1
2 - LA TEXTURE	p.	2
3 - LA STRUCTURE	p.	4
4 - LA POROSITE ET LA DENSITE DU SOL	p.	5
5 - INFLUENCE DU LABOUR A LA CHARRUE SUR L'ENRACINEMENT ET LES RENDEMENTS	p.	7
6 - INCONVENIENTS DES LABOURS PROFONDS A LA CHARRUE	p.	11
CONCLUSION	p.	13

CHAPITRE II : LE CYCLE DE L'AZOTE ET LES BACTERIES DU CYCLE DE L'AZOTE	p.	14
1 - ORIGINE DE L'AZOTE	p.	14
1.1. Azote apporté par les pluies	p.	14
1.2. Fixation aérobie par les bactéries	p.	14
1.3. Fixation par les algues	p.	17
1.4. Fixation anaérobie par les rhizobiums	p.	17
1.5. Fixation anaérobie par les bactéries	p.	20
2 - QUANTITE D'AZOTE ATMOSPHERIQUE FIXE PAR LES BACTERIES ET LES ALGUES	p.	20
3 - EVOLUTION DE L'AZOTE DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL	p.	21
3.1. La minéralisation de la matière organique	p.	22
3.2. Ammonification	p.	22
3.3. Nitrification	p.	24
4 - DENITRIFICATION ET PERTE D'AZOTE	p.	26
5 - CONCLUSION	p.	26
 CHAPITRE III : L'AZOTE, LES PLANTES CULTIVEES ET L'UTILISATION DES ENGRAIS AZOTES EN AFRIQUE TROPICALE FRANCOPHONE	p.	28
1 - BESOINS EN AZOTE	p.	28
2 - AZOTE DU SOL, pH et FERTILITE	p.	30
3 - LES ENGRAIS AZOTES UTILISES EN AFRIQUE	p.	32
3.1. Forme des engrais utilisés	p.	32
3.2. Valeur agronomique des différentes formes d'engrais	p.	33
4 - ACIDIFICATION DU SOL DUE AUX ENGRAIS AZOTES	p.	34
4.1. Sulfate d'ammoniaque	p.	34
4.2. Autres engrais azotés	p.	35
4.3. Mécanisme de l'acidification	p.	35
4.4. Lixiviation de l'azote des engrais	p.	36
5 - COMMENT EVITER L'ACIDIFICATION DUE AUX ENGRAIS AZOTES	p.	37
CONCLUSION	p.	38

CHAPITRE IV : pH DU SOL ET RENDEMENT DES CULTURES	p. 40
1 - INFLUENCE DU pH SUR LES RENDEMENTS	p. 40
2 - CAUSE DE L'ACTION DU pH SUR LES RENDEMENTS	p. 41
2.1. Activité des bactéries	p. 42
2.2. Teneur en bases échangeables du sol	p. 42
2.3. Toxicité du manganèse et de l'aluminium	p. 43
2.4. Blocage du phosphore dans les sols	p. 43
2.5. Inassimilabilité des oligo-éléments	p. 44
CONCLUSION	p. 44
 CHAPITRE V ; APPORT D'AMENDEMENTS CALCIQUES ET CALCO-MAGNÉSIENS	p. 45
1 - LES ESSAIS DE CHAULAGE	p. 45
2 - NECESSITE D'UN APPORT DE CALCIUM ET DE MAGNESIUM	p. 47
3 - INCONVENIENT DES AMENDEMENTS CALCIQUES ET MAGNÉSIENS	p. 49
4 - AMENDEMENTS CALCAIRES ET LIXIVIATION DES BASES	p. 49
5 - AMENDEMENTS CALCIQUES ET ACTIVITE MICROBIENNE	p. 50
6 - AUTRES PROCÉDES UTILISES POUR CORRIGER L'ACIDITE DU SOL	p. 51
CONCLUSION	p. 52
 CHAPITRE VI : LE POTASSIUM DANS LES SOLS TROPICAUX ET LE PROBLEME DE LA CORRECTION DES CARENCES	p. 54
1 - LES TENEURS EN POTASSIUM DU SOL COMPATIBLES AVEC LES CULTURES	p. 54
1.1. Les teneurs limites	p. 54
1.2. Les équilibres entre potassium et magnésium-calcium	p. 55
1.3. Validité des rapports Mg/K et $Mg^{+}Ca/K$	p. 57
2 - LES TENEURS EN K ET LES PRINCIPALES CARENCES	p. 58
3 - PERTES EN POTASSIUM PAR LIXIVIATION DANS LES SOLS CULTIVES	p. 61
4 - FORME DES ENGRAIS POTASSIQUES UTILISES ET ACIDIFICATION DU SOL PAR LES ANIONS Cl^{-} et SO_{4}^{--}	p. 63
5 - ALIMENTATION POTASSIQUE DE LA PLANTE ET LE TYPE D'ARGILE	p. 64
CONCLUSION	p. 65

CHAPITRE VII : LE PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX	p.	67
1 - LES FORMES DU PHOSPHORE DANS LES SOLS	p.	67
2 - LES TENEURS EN PHOSPHORE DES SOLS ET LES PLANTES CULTIVEES	p.	70
2.1. Besoins en phosphore	p.	70
2.2. Teneurs limites en P_2O_5 total	p.	71
2.3. Utilisation du rapport N/P_2O_5	p.	73
2.4. Phosphore assimilable	p.	74
3 - INTERACTIONS DU PHOSPHORE AVEC D'AUTRES ELEMENTS	p.	75
4 - LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS, LIXIVIATION ET INSOLUBILISATION	p.	76
5 - LES ENGRAIS PHOSPHATES	p.	78
5.1. Forme des engrais et leur efficacité	p.	78
5.2. Effet résiduel des engrais phosphatés	p.	82
CONCLUSION	p.	84
 CHAPITRE VIII : LE SOUFRE ET LES CARENCES EN SOUFRE	p.	85
1 - LE SOUFRE DANS LES SOLS	p.	85
2 - FORME DU SOUFRE ASSIMILABLE PAR LES PLANTES	p.	90
3 - DYNAMIQUE DU SOUFRE	p.	90
CONCLUSION	p.	91
 CHAPITRE IX : OLIGO-ELEMENTS, CARENCE ET TOXICITE ; BORE, MOLYBDENE, CUIVRE, ZINC, MANGANESE	p.	93
1 - BORE	p.	93
1.1. Principales carences	p.	93
1.2. Toxicité	p.	94
1.3. Correction des carences	p.	94
1.4. Influence du chaulage sur les carences en bore	p.	94
1.5. Interaction du bore et d'autres éléments minéraux	p.	94
2 - MOLYBDENE	p.	95
2.1. Principale carence	p.	95
2.2. Toxicité	p.	95
2.3. Correction des carences	p.	95
2.4. Influence du chaulage sur le molybdène du sol et interaction Ca-Mo	p.	96

3 - CUIVRE ET ZINC	p:	96
3.1. Carence	p.	96
3.2. Toxicité	p.	97
3.3. Correction des carences	p.	97
3.4. Influence des amendements calciques sur les carences	p.	97
3.5. Interactions cuivre-matière organique	p.	97
4 - MANGANESE	p.	97
4.1. Les carences	p.	98
4.2. Toxicité due au Manganèse	p.	99
4.3. Corrections des toxicités et influence des amendements calciques	p.	99
4.4. Interactions du Manganèse et des autres éléments du sol	p.	100
CONCLUSION	p.	101
CHAPITRE X : L'ALUMINE, LE FER ET LA SILICE DANS LES SOLS ET LEURS RELATIONS AVEC LES PLANTES CULTIVEES	p.	103
1 - ALUMINE	p.	103
2 - FER	p.	104
3 - SILICE DANS LES SOLS TROPICAUX	p.	106
CHAPITRE XI : EVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURE	p:	108
1 - EROSION DU SOL APRES DEFRICHEMENT ET SOUS CULTURE	p.	109
1.1. Intensité de l'érosion en Afrique	p.	109
1.2. Ruissellement et pertes en terre	p.	109
1.3. Importance qualitative des pertes par érosion	p.	111
1.4. Comment limiter ou éviter l'érosion	p.	112
2 - ECONOMIE DE L'EAU APRES DEFRICHEMENT	p.	114
3 - EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE	p.	116
3.1. Baisse immédiate après défrichement	p.	116
3.2. Tendence à la stabilisation des taux de matière organique sous culture	p.	117
3.4. Peut-on conserver la teneur initiale en matière organique	p.	118
3.3. Modification de la composition de l'humus	p.	118
3.5. CONCLUSION : un niveau de matières organique acceptable pour les cultures est probablement possible à obtenir	p.	119

4 - EVOLUTION DES BASES ECHANGIABLES ET DU pH	p.	120
4.1. Rupture de l'équilibre naturel par la culture	p.	120
4.2. Baisse du pH et pertes en bases par drainage et exportation ..	p.	120
5 - EVOLUTION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS	p.	124
5.1. Sols hydromorphes et irrigués	p.	125
5.2. Sols ferrugineux tropicaux	p.	125
5.3. Sols ferrallitiques	p.	126
5.4. Vertisols	p.	120
5.5. CONCLUSION	p.	129
6 - LA JACHERE, L'ENGRAIS VERT ET LE PROBLEME DE LA CULTURE CONTINUE ..	p.	129
6.1. Utilité et inconvénient de la jachère	p.	129
6.2. Utilisation des engrais verts	p.	131
6.3. Les rotations culturales	p.	132
6.4. La culture continue est-elle possible ?	p.	133
7 - CONCLUSION	p.	134
8 - ANNEXE : PLANTATIONS PERENNES	p.	135
Evolution des sols dans les plantations pérennes :		
caféières, cacaoyères, bananeraies, plantations d'hévéas		
ou de palmiers à huile		
BIBLIOGRAPHIE	p.	138

I N T R O D U C T I O N

LES PRINCIPAUX TYPES DE SOL D'AFRIQUE FRANCOPHONE

1 - LES FACTEURS DE FORMATION DES SOLS

1.1. Le climat et la végétation.

AUBREVILLE (1949) distingue un certain nombre de zones climatiques.

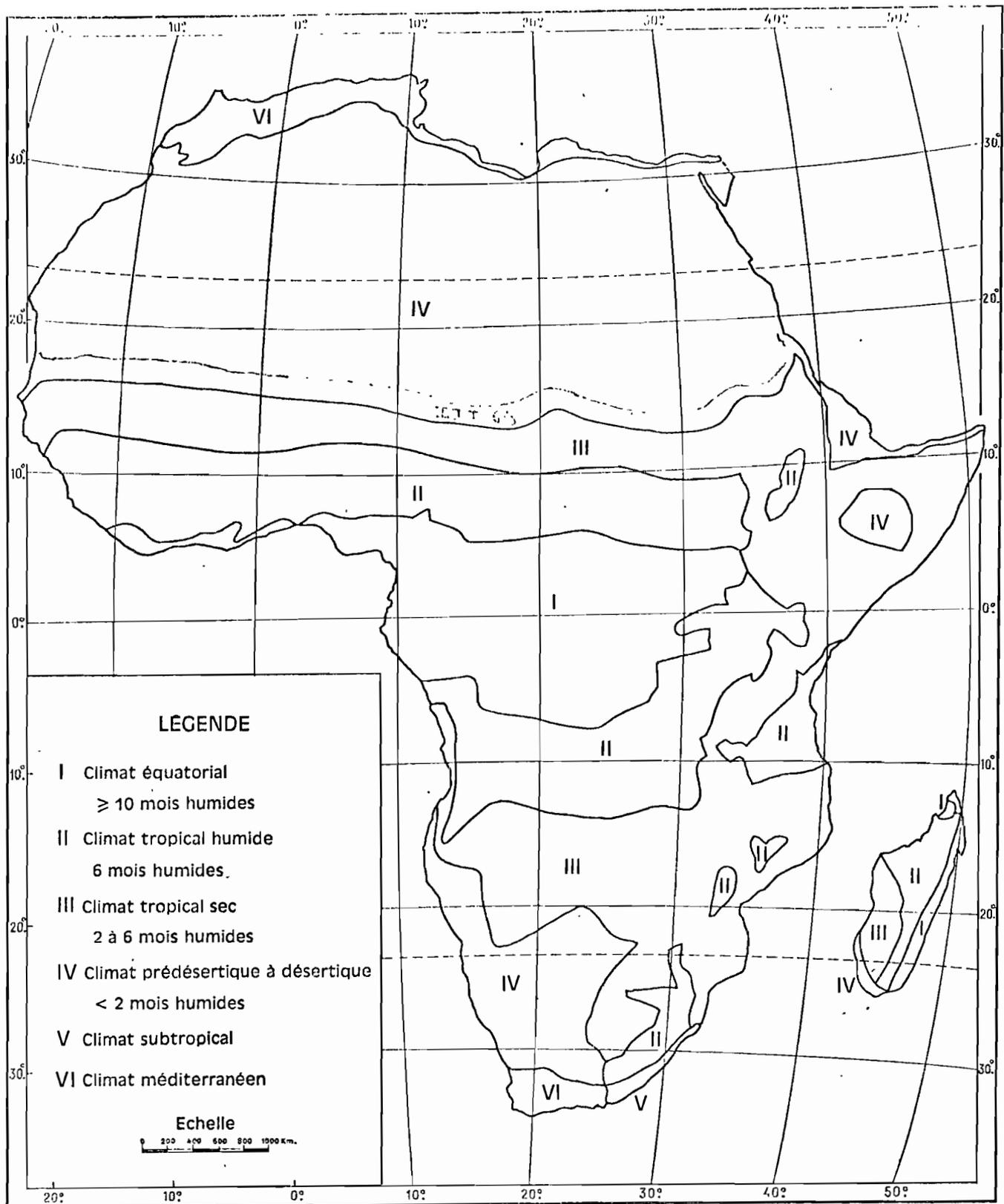
1.1.1. Climat Sahélo-saharien. Zone climatique IIIbis :

- pluviosité 200 à 400 mm,
- durée de la saison des pluies 1 à 2 mois,
- type de végétation : steppe herbacée ou buissonnante très claire,
- longue bande étroite (quelques degrés) qui passe par le nord du Sénégal, Tombouctou, Gao et le lac Tchad,
- c'est une zone très sèche, subdésertique qui n'est concernée qu'exceptionnellement par cette étude et uniquement sur sa frange méridionale.

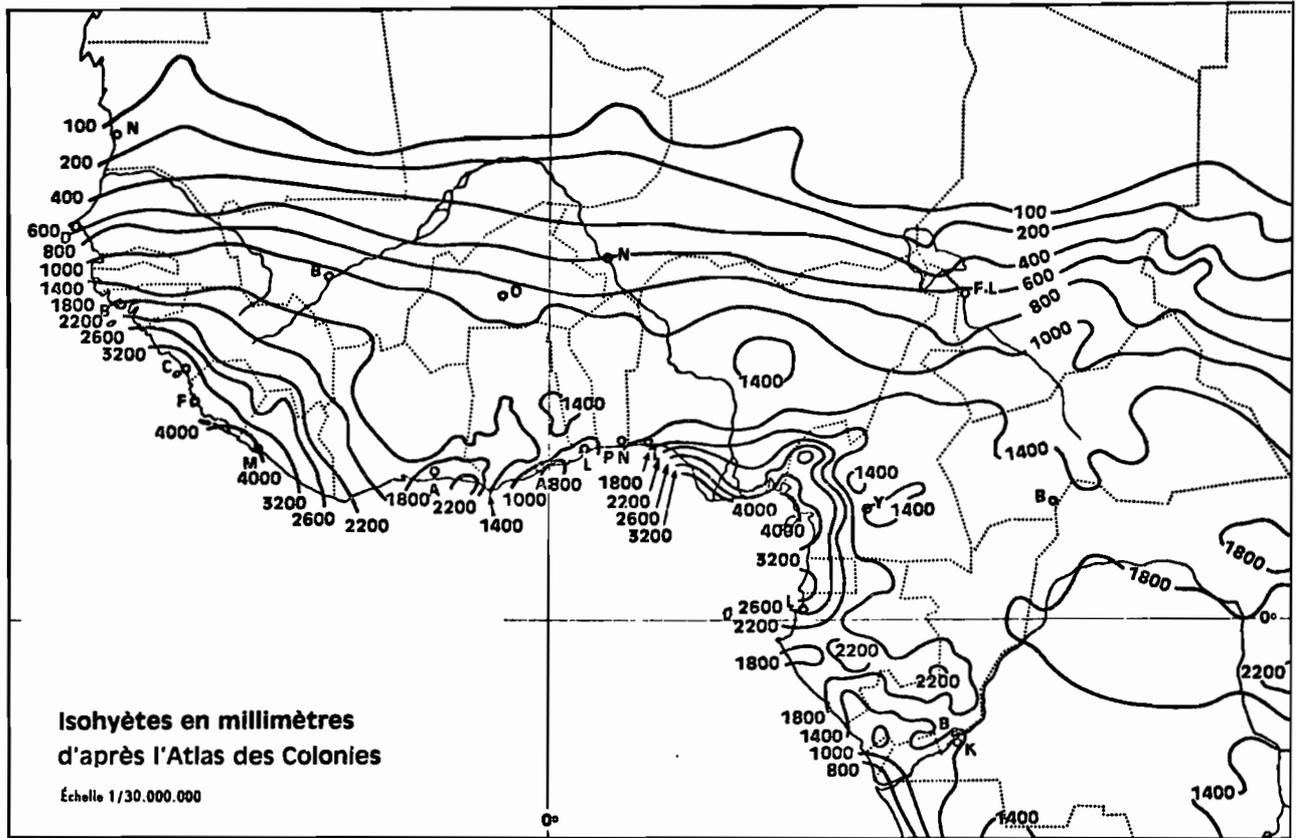
1.1.2. Climat sahélo-soudanais ou tropical sec (ou semi-humide) (Zone climatique III) :

- pluviosité : 400 à 1000 mm,
- une seule saison des pluies durée : 3 à 5 mois,
- intensité de la saison sèche : 8 à 6 mois sans aucune pluie,
- type de végétation : savane (*) herbeuse ou arbustive parfois arborée (si elle n'a pas été dégradée par l'action de l'homme).

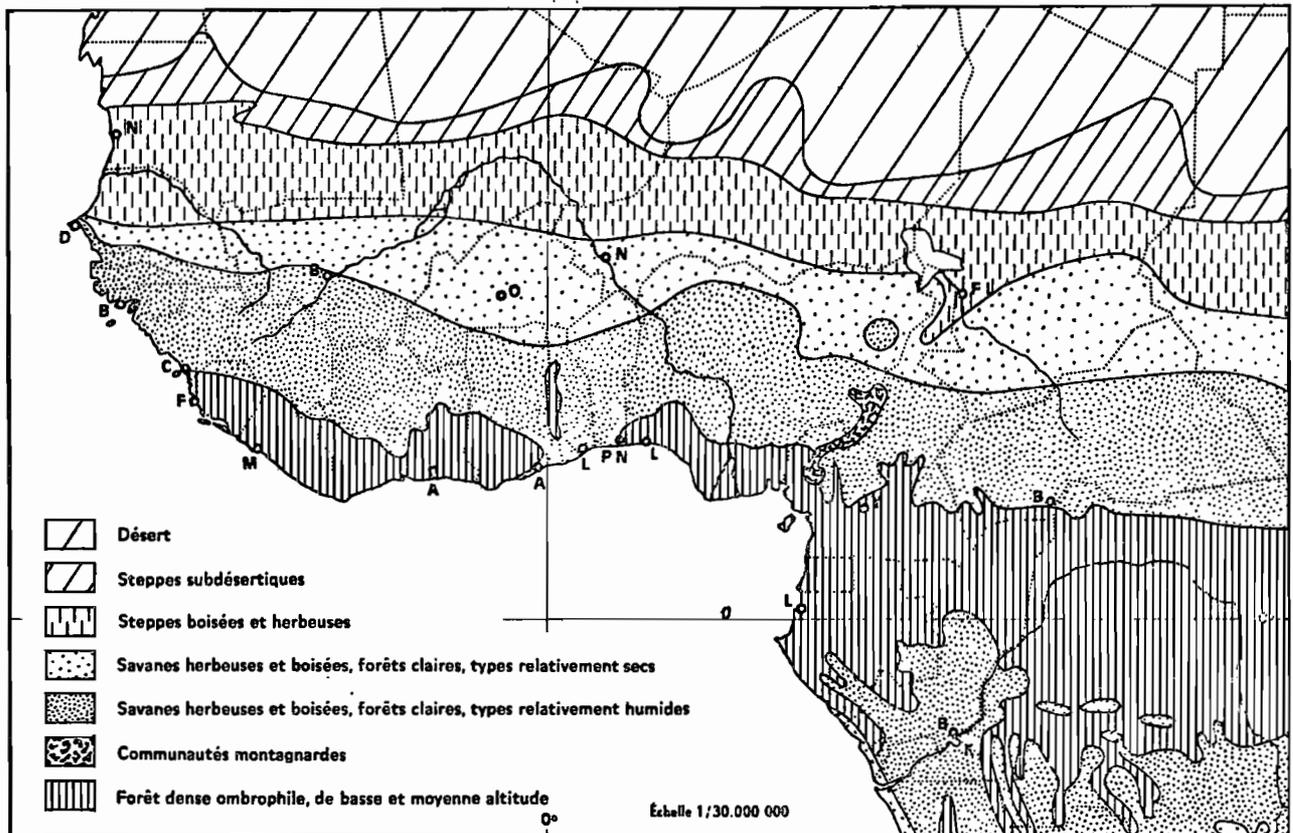
(*) A défaut de définition précise, on considèrera que la steppe ne possède pas de strate herbacée assez dense pour être parcourue par les feux annuels alors que la savane brûle tous les ans (sauf exception) y compris les sous-bois forestiers.



Les grandes zones climatiques d'Afrique - (d'après Aubréville).



PLUVIOMETRIE TOTALE ANNUELLE DE L'AFRIQUE CENTRALE ET OCCIDENTALE



LA VÉGÉTATION EN AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE (d'après A.E.T.F.A.T. 1959)

La zone Sahélo-soudanienne forme une bande ouest-est qui couvre approximativement 4 à 5 degrés de largeur entre le 11-12ème et le 16ème degré géographique de latitude nord en Afrique occidentale, et le 9-10ème et 14ème degré de latitude nord en Afrique centrale (Tchad).

1.1.3. Climat soudano-guinéen ou tropical humide, Zone climatique II.

- Pluviosité : 950-1000 mm jusqu'à 1200-1400 mm,
- Une seule saison des pluies ; durée 6 à 7 mois,
- Intensité de la saison sèche : il n'y a guère que 4 à 2 mois sans pluie notable, les autres mois présentant toujours quelques précipitations d'intensité variable, sauf dans les savanes du sud du Congo-Brazzaville où une nébulosité considérable compense l'absence totale de pluie pendant 5 à 6 mois,
- Type de végétation : savane herbacée avec un peuplement arbustif ouvert et plus rarement (si l'action de l'homme est faible) savane arborée pouvant passer à la savane-parc ou à la forêt sèche ; forêt-galerie le long des rivières,
- Répartition géographique : la zone soudano-guinéenne s'étend sur une bande ouest-est, couvrant une largeur de 4 à 5 degrés géographiques (entre le 7ème et le 12ème degré de latitude nord) en Afrique occidentale, et une largeur de 4 à 5 degré (entre le 5ème et 9-10ème degré de latitude nord) en Afrique centrale.
Il s'étend également au Congo-Brazzaville au sud du 4ème degré de latitude sud.

1.1.4. Climat guinéen ou équatorial (Zone climatique I).

- Pluviosité : 1400 mm à 2000 mm et plus,
- Deux saisons des pluies séparés par deux saisons sèches dont l'intensité est variable mais ne comportant que rarement plus de deux mois sans aucune précipitation,
- Type de végétation : c'est la zone de la forêt dense humide, avec sur ses bordures nord et sud des savanes arbustives (Guinée orientale, centre et frange côtière de la Côte d'Ivoire, Togo du sud et Dahomey du sud,

et Dahomey du sud, région centrale du Cameroun, sud de la République Centrafricaine et savanes Bateké au nord de Brazzaville).

- Répartition géographique : Afrique occidentale : entre la Côte du Golfe de Guinée et 7ème degré de latitude nord environ - Afrique centrale : entre le 5ème degré de latitude nord et le 4ème degré de latitude sud.

1.2. Géologie.

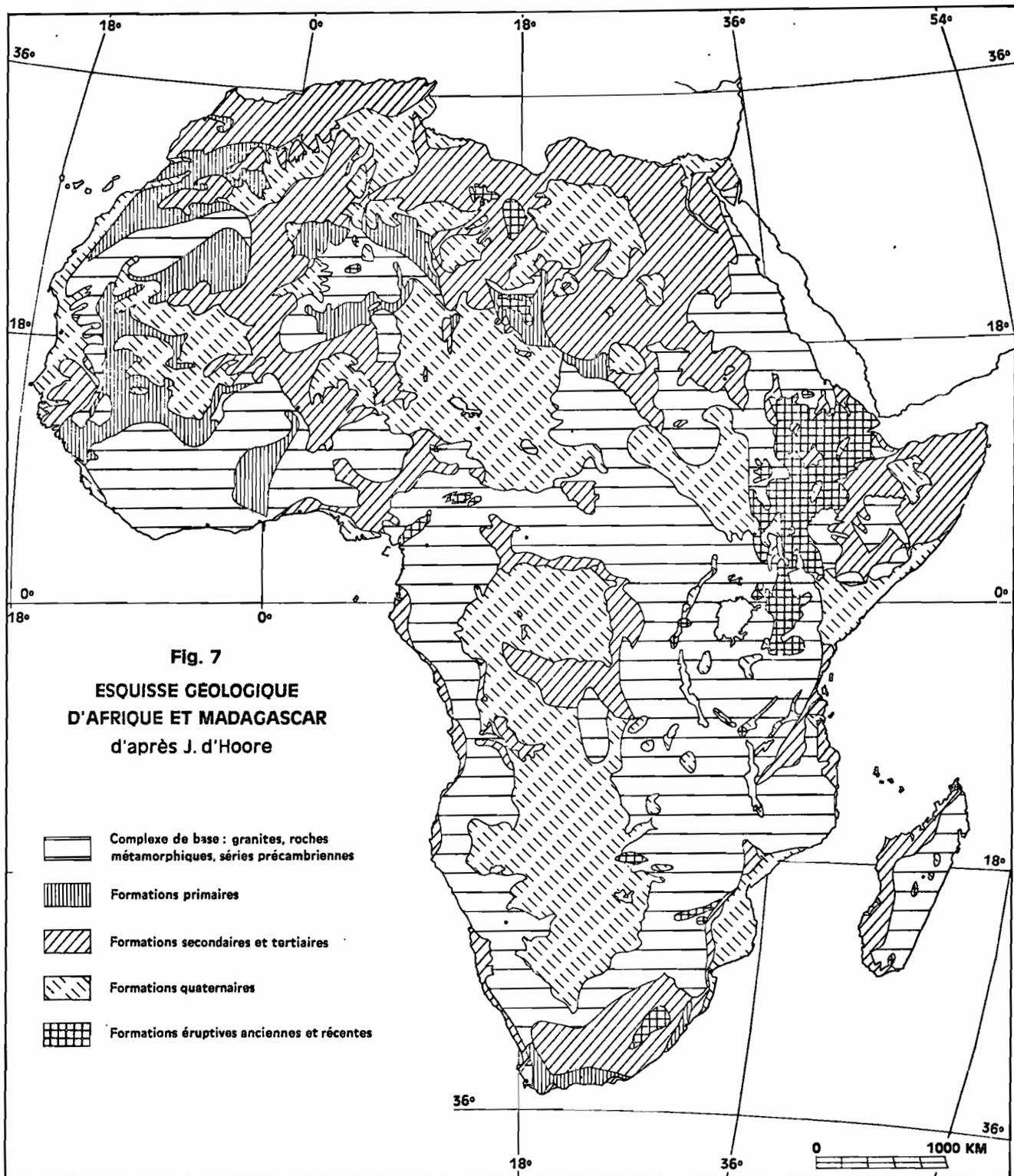
La géologie des pays d'Afrique francophone intertropicale est caractérisée par l'extraordinaire extension des formations anciennes du précambrien et du primaire.

Le précambrien est particulièrement bien représenté (du Dahoméen au Falémien) et forme le soubassement de tout le socle africain.

Au point de vue pétrographique, les roches sont très variées. Il peut s'agir :

- de quartzites : Haute-Volta, Niger, République Centrafricaine, Congo-Brazzaville,
- de granites alcalins ou calco-alcalins : Est de la Côte d'Ivoire, Togo, Dahomey, ouest de la République Centrafricaine, est du Cameroun,
- de granite à amphibole ou hypersthène : Sud-ouest de la Côte d'Ivoire, nord du Dahomey, nord du Cameroun, Tchad,
- de roches plutoniques métamorphisées à tendance mélancrate : Diorite et Dolérite en Guinée, au sud-ouest de la République Centrafricaine et au sud-est du Cameroun, amphibolite et pyroxénite dans l'est de la République Centrafricaine,
- de schistes soit relativement alcalins, soit fortement ferromagnésiens séricite et chloritoschiste du centre-est de la République Centrafricaine ; schiste ferromagnésien du Tchad, de Côte d'Ivoire, du Mayombe au Congo-Brazzaville.

- Les formations secondaires et tertiaires sont surtout représentées par le Continental Terminal (grès ferrugineux à kaolinite) que l'on trouve au Sénégal, au Mali, au Niger et jusqu'au Tchad.



Les calcaires sont rares mais ils existent au Sénégal et au Niger. Il faut y adjoindre quelques formations secondaires lacustres (grès et plus rarement des argilites) en République Centrafricaine et marines comme les sables tertiaires de la frange côtière de Côte d'Ivoire, du Gabon et du Congo-Brazzaville.

- Les formations quaternaires recouvrent de vastes espaces dans les dépressions intérieures (cuvette du Tchad, et delta central du Niger) : ce sont en général des sables et des grès tendres, plus rarement des sédiments argileux (Mali, Tchad).

- Le volcanisme récent (fin tertiaire et quaternaire) n'a guère affecté que la cassure qui prend en écharpe le Cameroun occidental ainsi que la région de Dakar ; les produits déposés sont essentiellement des basaltes, mais les explosions ont parfois saupoudré de cendres alcalines des sols anciens (Cameroun) et leur ont ainsi fournis des éléments minéraux riches en bases (SEGALEN 1967).

La stabilité presque complète du socle africain depuis le primaire fait de cette région une zone où les pédogenèses successives ont fortement marqué le paysage : le centre de la Guinée, certaines régions du Mali, de Haute-Volta, du Niger et surtout l'est de la République Centrafricaine sont couvertes d'immenses cuirasses latéritiques que les géologues datent, pour une grande part, de la fin du tertiaire. Certaines sont plus anciennes (Crétacé), mais il s'en forme encore actuellement en de nombreuses régions.

L'évolution pédologique a pu se développer à l'abri de la forêt sans être gravement perturbée pendant des centaines de millénaires (et davantage peut-être), d'où un appauvrissement considérable des réserves minérales héritées des roches-mères et le développement de sols chimiquement pauvres.

Naturellement dans les régions les plus sèches (donc moins protégées par la végétation) ou les plus accidentées, l'érosion a mis à nu les roches, d'où la formation de sols où se retrouvent plus abondamment les éléments minéraux provenant de la roche-mère.

Malgré quelques exceptions remarquables, sols sur roches volcaniques du Cameroun, sols sur dolérite de Guinée, de République Centrafricaine, et, dans une moindre mesure, sols sur schistes de Côte d'Ivoire et du Mayombe, la plus grande partie des sols d'Afrique francophone est formée sur des roches acides (quartzites, grès, sables, granites alcalins) ou des alluvions et apports éoliens provenant de ces

mêmes roches ; à priori, on peut considérer que les teneurs en bases de ces sols seront faibles, ce qui, malheureusement, est le plus souvent confirmé par les prospections et les études précises

1.3. Géomorphologie.

Le premier trait qui frappe le voyageur parcourant l'Afrique occidentale et l'Afrique centrale est la vaste étendue des zones planes qu'il s'agisse des immenses dépressions fermées (delta central du Niger, cuvette du Tchad, cuvette congolaise) ou des plateaux d'altitude moyenne (300 à 1200 m). En dehors de quelques volcans et mesa volcaniques au Cameroun, les seules zones accidentées que l'on y trouve sont les escarpements en marche d'escalier qui bordent les dépressions ou délimitent entre eux les plateaux d'altitudes différentes (300-400 m, 600-800 m, 1200-1400 m) ; on trouve également des buttes témoins (Inselberg), restes d'un plateau plus ancien actuellement disparu.

L'érosion (*) a découpé toute cette partie de l'Afrique tropicale en deux types de modelé distincts :

- dans les dépressions de même que sur les glacis, parfois très vastes, qui entourent les plateaux, le relief est quasi inexistant avec des rivières aux larges vallées à peine enfoncées dans le paysage.
- sur les plateaux, les surfaces pratiquement horizontales sont coupées par de profondes vallées qui cloisonnent le paysage.

On peut distinguer dans cette immense région des zones où dominent à la fois des conditions climatiques générales, des types de sols et des types de modelé :

- Zone équatoriale et tropicale très humide, où des ferrallites forment le sol essentiel ; les collines présentent un modelé en demi-oranges ;

(*) Il s'agit ici de l'érosion géologique et non de l'érosion pédologique habituellement due à l'action de l'homme et de ses cultures ;

- Zone tropicale humide à saison sèche ; sols ferrallitiques moyennement ou très lessivés et sols blanchis ; grands plateaux et collines à profils convexes ;
- Zone plus sèche, subhumide, à sols ferrugineux plus ou moins lessivés et par places sols solodisés et vertisols ; développement des immenses glacis et des grandes plaines souvent endoériques dominées par des collines en insulbergs...

2 - LES GRANDS TYPES DE SOLS TROPICAUX

=====

La classification utilisée est celle employée par les pédologues travaillant en Afrique francophone ; elle a été établie par AUBERT (1965 a et b) et les pédologues de l'O.R.S.T.O.M., d'après celle proposée par AUBERT et DUCHAUFOR (1956).

Les correspondances avec les autres classifications sont celles établies par DUCHAUFOR et par le groupe de la Carte des sols du monde de la F.A.O. (1968).

2.1. Sols subarides.

Ces sols existent uniquement dans l'extrême nord de la zone étudiée (Zone climatique IIIbis) ; ils ne sont mentionnés ici que pour mémoire. Ce sont des sols à profil peu différencié A (B) C, parfois A B C.

Les matières organiques, en faible quantité, sont caractérisées par un rapport : acides humiques élevé (de l'ordre de 2) avec une nette prédominance acides fulviques des acides humiques gris sur les acides humiques bruns.

Le complexe absorbant est généralement saturé en calcium parfois en magnésium. La réaction du sol est neutre ou alcaline (présence de sodium) :

Classification américaine, (Mollic) aridisole,

Classification F.A.O., Xerosols.

2.2. Sols ferrugineux tropicaux.

- Localisation : Zone climatique III.
- Sols à profils A (B) C, A B C et A Bg C.

L'horizon A est le plus souvent sableux de couleur grise. Souvent il passe à

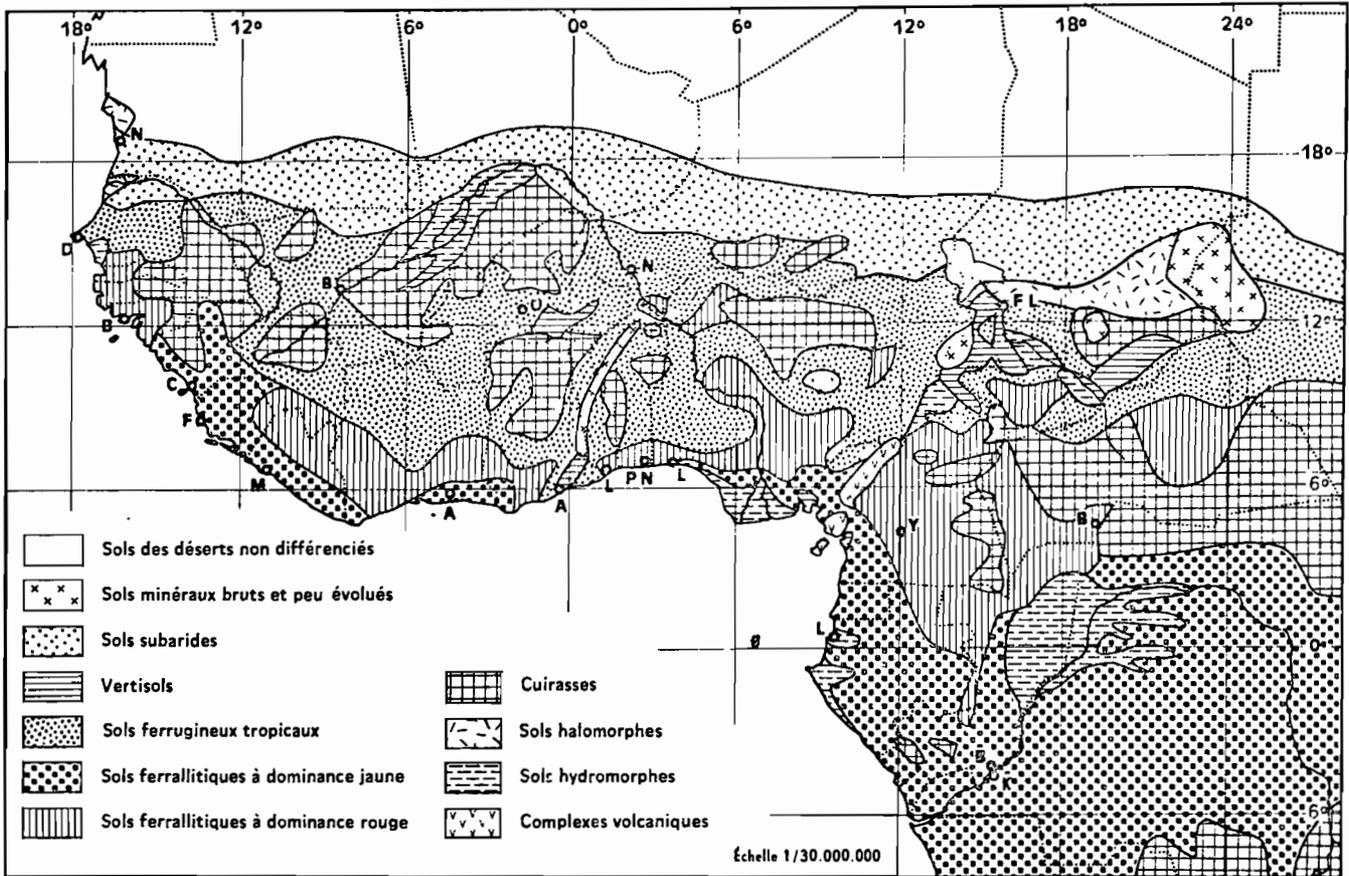


Fig. 1 - Esquisse pédologique de l'Afrique centrale et occidentale.

D'après J. Dhoore et les plus récents travaux pédologiques de l'O. R. S. T. O. M.

sablo-argileux à moyenne profondeur.

Dans certains sols la migration d'argile est faible et il n'existe qu'un (B). La plupart de ces sols présentent un horizon B textural (présence d'argile illuviale) souvent coloré en jaune ou rouge par des hydroxydes de fer ; s'ils sont assez abondants, ces derniers peuvent s'individualiser en concrétions, gravillons, carapaces ou cuirasses.

L'argile est en majeure partie du type kaolinite mais le plus souvent accompagné d'illite.

Dans certains cas, il peut y avoir formation d'un peu d'argile.

Les conditions de pédogenèse favorisent la séparation des sesquioxydes de fer d'avec les particules argileuses et leur migration en B.

- La structure est généralement massive et continue et peu poreuse en A et B ; ce caractère, joint au relief très faible et à une pluviosité brutale et concentrée sur 3 à 6 mois, entraîne un mauvais drainage et l'apparition fréquente de phénomènes d'hydromorphie de profondeur (pseudogley).
- La matière organique est peu à moyennement abondante, car son évolution est rapide (taux de minéralisation 3 à 5 % au Sénégal), elle est de type Mull. Les teneurs peuvent varier de 0,3 % de C organique dans les zones cultivées à 1,5 à 1,8 % sous savane fortement boisée ; elles sont souvent inférieures à 1 %. Les acides humiques sont plus abondants que les acides fulviques :
$$\frac{\text{Acides humiques}}{\text{Acides fulviques}} > 1$$
 et les acides humiques gris dominent assez largement les acides humiques bruns dans les zones les plus sèches (400 à 500 mm de pluie) mais les seconds ont tendance à augmenter au fur et à mesure que la pluviosité augmente (THOMANN).
Il en est de même pour les acides fulviques : leur pourcentage augmente si la pluviométrie croît.
Quoique très évoluée cette matière organique possède un C/N qui atteint souvent 12 et, parfois, dépasse cette valeur.
- La capacité d'échange est faible (1 à 5 milliéquivalents).
- Le complexe absorbant est saturé à environ 60 % dans l'horizon B, saturation qui est très variable en A en fonction des précédents culturaux.

- La réaction des sols (non dégradés par la culture) est voisine de la neutralité (pH compris entre 6 et 7) mais peut devenir franchement acide (pH 5) après plusieurs années de culture.

- Classification : ces sols sont subdivisés en :

1°) Sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés,

profil A₁ (B₂) C

2°) Sols ferrugineux tropicaux lessivés,

profil A₁ A₂ B₂ C

A₁ A₂ B_{2g} C, (très souvent ces profils comportent un

A₃.)

- Roche-mère : très variable mais généralement acide.

- Position topographique: principalement vastes zones plates sans relief et glacis d'érosion des plateaux.

Dans de grandes zones telles que les plateaux de Haute-Volta, ces sols ont été largement remaniés dans leurs horizons supérieurs (Kaloga, communication orale).

Aussi définit-on souvent un groupe de Sols ferrugineux tropicaux remaniés.

Un dernier groupe de sols ferrugineux tropicaux appauvris a aussi été proposé.

- Correspondance.

Classification française	Classification américaine	Classification F.A.O.
. Ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés	Psaments	-
. Ferrugineux tropicaux lessivés	Haplustaffs	Ferric Luvisols

2.3. Vertisols.

- Localisation : Zone climatique III et Zone climatique II.

- Roche-mère : calcaire dolomitique, dolomie, marne.

- Position topographique : zones planes sans écoulement latéral ou dépressions.

- Sols à profil A (B) C, A (B)g C ou A (B) Cg.
- La couleur de l'horizon A est brune ou noire, parfois gris-verdâtre assez foncée.
Celle de l'horizon B est variable : noire, jaune, brun-rouge ou même verdâtre.
- L'argile est typiquement une montmorillonite ou un mélange à propriétés gonflantes. L'une ou l'autre représente environ des 35 à 80 % de l'argile (0 à 2 microns) qui constitue toujours plus de 25 à 30 % (et souvent plus de 60 %) du sol.
- La structure est formée de larges agrégats à faces striées séparées par de larges fentes de retrait verticales et par des faces de glissement luisantes striées, obliques et se recoupant, résultat des tensions internes qui provoquent souvent en surface un micro-relief "gilgai".
Dans ces sols argileux, la structure prismatique est large et la porosité des agrégats est très faible.
- La matière organique n'est pas aussi abondante que pourrait le laisser croire la couleur foncée de l'horizon superficiel (1 à 2 % de C organique tout au plus), mais les colloïdes humiques imprègnent les réseaux argileux de façon intime.
- La capacité d'échange est élevée : 30 à 40 m.é./100 g.
- Le complexe absorbant est saturé de 80 à 100 % par du calcium et du magnésium (ce dernier peut représenter jusqu'à 40 à 50 % des bases échangeables).
- Le pH est peu acide ou neutre (pH 6,0 à 7,2). Il n'est pas rare que ces sols soient très pauvres en acide phosphorique .
- Classification :
 - Vertisols sans drainage externe (dépressions),
 - " avec drainage externe,
 - Intergrades fréquents : (Vertisols - sols ferrugineux tropicaux,
 - (Vertisols - sols bruns eutrophes,
 - (Vertisols - sols hydromorphes.
- Correspondance :
Classification américaine : Vertisols.
Classification F.A.O. : Vertisols.

2.4. Sols bruns eutrophes.

- Localisation géographique : Zones climatiques III et II (dans la zone II les sols bruns eutrophes sont moins typiques et évoluent très rapidement vers les sols ferrallitiques).
- Position topographique : toutes positions sauf bas-fonds humides en zone III, sur des modelés accidentés en zone II.
- Roche-mère : toute roche, surtout éruptive ou métamorphique, basique (riche en Ca) Diorite, gabbro, basalte, parfois granite fortement alcalin (granite à amphibole), schistes.
- Profil A (B) C.
L'horizon A est bien lié à la matière organique; il possède une structure nuciforme bien développée ; il est souvent relativement argileux.
L'horizon (B) a typiquement une structure cubique ou polyédrique moyenne ; celle-ci peut devenir prismatique ou polyédrique grossière en zone semi-humide (III), le sol prend alors des caractères vertiques.
- L'argile est formée d'un mélange de kaolinite, illite et montmorillonite, celle-ci peu abondante en zone II est susceptible de donner aux sols de la zone III quelques propriétés de vertisols (structure très grossière, larges fentes de retrait, etc...).
- Matière organique : elle est du type Mull et toujours bien incorporée à A₁ ; les teneurs restent faibles car l'évolution est rapide.
Le rapport $\frac{\text{Acides humiques}}{\text{Acides fulviques}}$, nettement supérieur à 1 en zone III (semi-humide) tend à diminuer en zone II. Il en est de même pour la proportion des acides humiques gris qui baisse lorsqu'on passe de la zone III à la zone II.
- Capacité d'échange.
Elle est relativement élevée, entre 10 et 20 m.é./100 g, surtout grâce à la présence d'illite et de montmorillonite.
- Degré de saturation.
Le complexe absorbant est généralement saturé entre 70 et 90 %, le calcium représentant la plus grosse part des cations.

- pH, voisin de la neutralité (entre 6 et 7), rarement supérieur à 7.

- Correspondance :

Classification américaine : Xero crepts,

Usto crepts.

Classification F.A.O. : Eutric cambisols.

2.5. Sols ferrallitiques.

- Localisation géographique : Zones climatiques II et I.

- Position topographique : plateau, pentes, plaines, collines ou vallées, à l'exclusion de certaines zones trop humides de bas-fonds où se développent des sols hydromorphes.

- Roche-mère : toute catégorie de roche sauf certains matériaux trop uniquement quartzaux.

- Profil A (B) C ou A B C.

L'horizon A contient une matière organique très évoluée, en général, et très liée à la matière minérale. Cependant dans les sols de type "gênile" très lixiviés, elle peut être assez grossière : humus brut tropical.

Certains sols ferrallitiques appauvris peuvent présenter un horizon A₂ qui ne correspond pas toujours à un enrichissement du B en argile, mais à une "fonte" de la base de A avec entraînement de colloïdes en dehors du profil par lessival latéral.

L'horizon B de couleur rouge ou jaune est épais et ne contient pratiquement plus de minéraux primaires autres que le quartz, l'ilménite, la magnétite et le zircon. L'argile y est essentiellement constituée de kaolinite et de sesquioxydes de fer et d'aluminium.

Il est parfois séparé de l'horizon A par une nappe de gravats qui peut pénétrer dans l'horizon B.

Les oxydes et hydroxydes de fer et d'alumine sont abondants en B ; ils peuvent donner naissance à des concrétions, carapace et cuirasse, ces dernières ont parfois des épaisseurs importantes (plusieurs mètres). Sauf là où il est induré par les oxydes métalliques (Fe, Al, Mn, Co), cet horizon est très friable, sa structure pouvant être parfois polyédrique fine à moyenne.

L'horizon C possède des caractéristiques variables qui dépendent de la roche-mère ; quelle que soit son épaisseur (quelques centimètres jusqu'à 20 mètres et plus), il contient les minéraux de la roche-mère mais altérés et friables.

- L'évolution pédologique de ce type de sol se caractérise par :

- une altération complète des minéraux primaires que l'on ne retrouve plus en A et B (sauf le quartz, l'ilménite, la magnétite et le zircon),
- la présence de produits de néosynthèse, kaolinite, gibbsite, goéthite, oxydes et hydroxydes amorphes de fer et d'alumine.
- l'élimination d'une grande quantité des bases et d'une partie de la silice par dissolution.

- L'argile est du type kaolinite avec parfois de très petites quantités d'illite que l'on considère comme une relique de la roche-mère.

- La matière organique est riche en acides fulviques avec un rapport :

$$\frac{\text{Acides humiques}}{\text{Acides fulviques}} < 1.$$

En savane, elle est bien incorporée au sol sur toute l'épaisseur de l'horizon A₁ ; par contre, en forêt, elle peut être particulièrement importante dans les quelques centimètres superficiels sans cependant, en règle générale, constituer un A₀ ; elle décroît très rapidement en dessous (Horizon A₁) ; sa décomposition est rapide et donne naissance à une forte proportion d'acides fulviques.

- La capacité d'échange est faible (quelques milliéquivalents pour 100 g) en raison de la présence quasi-exclusive de la kaolinite ; elle peut être de 5 à 10 milliéquivalents en A grâce à la matière organique superficielle.

- La saturation en bases est très variable ; elle sert d'ailleurs de fondement à la classification française des sols ferrallitiques.

Dans presque tous les sols de ce type, elle est inférieure à 50 % ; le calcium forme l'élément dominant des bases échangeables.

- le pH est toujours inférieur à 6 ; assez peu acide dans les sols ferrallitiques jeunes et parfois aussi dans les sols de savane (pH de 5 à 6,5), il devient fortement acide (pH 3,5 à 5,5) dans les types les plus évolués.

- Classification des sols ferrallitiques:

L'horizon B est l'horizon de référence.

. Sols ferrallitiques faiblement désaturés (en B).

Somme des bases échangeables: 2 à 8 m.é. pour 100 g de sol,
degré de saturation 40 à 80 %,
pH 5,0 à 6,5.

Ils correspondent grossièrement au climat tropical à assez longue saison sèche (3 à 6 mois) avec 1200 à 1600 mm de pluie, soit la moitié nord de la zone II.

. Sols ferrallitiques moyennement désaturés (en B).

Somme des bases échangeables faible : 1 à 3 m.é. pour 100 g,
degré de saturation moyen : 20 à 40 %,
pH généralement compris entre 5 et 6.

Ces sols correspondent au climat équatorial à 4 saisons où la grande saison sèche dure 2 à 3 mois et au climat tropical à une saison sèche de 3 à 5 mois. La pluviométrie est de 1300 mm au moins.

. Sols ferrallitiques fortement désaturés (en B).

Somme des bases échangeables : 1 m.é. pour 100 g,
degré de saturation moyen < 20 %,
pH très acide < 5,5.

Ces sols correspondent au climat équatorial à 1 ou 4 saisons avec une période sèche très courte.

La pluviosité est supérieure à 1600 mm.

- Correspondances :

	Classification Américaine	Classification F.A.O.
. Ferrallitiques faiblement désaturés	Inceptisols	-
. Ferrallitiques moyennement désaturés	Oxysols	Ferralsols
. Ferrallitiques fortement désaturés	Oxysols ultisols	Ferralsols

2.6. Les andosols.

- Répartition géographique : les andosols existent en Afrique intertropicale francophone, uniquement dans les régions volcaniques d'Afrique centrale et du Cameroun. Leur extension est faible.
- Position topographique : toute position sauf les bas-fonds humides.
- Roche-mère : cendres et lapillis volcaniques récents.

- Profils A (B) C.

L'horizon A d'épaisseur variable (15 à 30 cm) est friable, doux au toucher et profondément pénétré par la matière organique ; il est de couleur brune.

L'horizon (B) d'épaisseur variable (30 à 100 cm) est de couleur brun-jaunâtre ; la structure est soufflée peu agrégée ; à l'état humide cet horizon est collant

Minéraux et composés amorphes du sol :

Les andosols comportent une assez grande quantité de minéraux provenant de la roche : verre, orthosilicates, pyroxènes, amphiboles, feldspaths plus ou moins altérés.

Leur caractéristique essentielle est de contenir une forte proportion de produits amorphes, les allophanes.

Il paraît difficile d'évaluer la richesse en argile granulométrique (0-2 microns) de ces sols, les teneurs des éléments trouvés à l'analyse variant essentiellement en fonction des procédés de dispersion.

L'halloysite accompagne les Allophanes en région tropicale.

La Matière organique est du type mull ; elle est relativement bien répartie dans toute l'épaisseur de l'horizon A et y donne des composés stables avec les allophanes. Ses teneurs peuvent varier fortement (2 à 30 % de matière organique), mais elles sont généralement élevées.

- Capacité d'échange : elle est difficile à mesurer mais elle semble élevée ; en plus de la fixation de cations, il peut y avoir une énergique fixation d'anions (PO_4^{---} en particulier).
- Degré de saturation et pH : voir classification.
- Classification : en pays tropical francophone, la classification est basée sur le degré de saturation,

- . Andosols saturés,
pH proches de la neutralité,
degré de saturation élevé,
l'halloysite accompagne les allophanes,
- . Andosols désaturés,
pH acide,
forte désaturation du complexe absorbant,
en plus de l'halloysite, on trouve de la gibbsite.

- Correspondances :

Classification américaine : Andepts,
Classification F.A.O. : Andosols.

2.7. Solonetz solodisés.

Ces sols existent par taches dans toute la zone climatique III et ne sont cités ici que pour mémoire.

Formés en général sur des granites alcalins, ils présentent un horizon A désaturé comportant un A₂ blanchi et un B prismatique à structure colonnaire contenant du sodium.

Ils ne sont pas habituellement utilisés pour les cultures.

2.8. Les sols hydromorphes.

A la différence de la classification américaine, la classification française considère comme sols hydromorphes tous les sols dont l'évolution^{est} dominée par l'action d'eau en excès : engorgement jusqu'à l'horizon A, nappe à faible ou moyenne profondeur.

De ce fait, on distingue trois sous classes :

- les sols hydromorphes organiques (ou tourbeux) -qui correspondent aux Histosols américains-,
- les sols hydromorphes moyennement organiques,
- et les sols hydromorphes minéraux.

2.8.1. Les sols hydromorphes organiques.

L'hydromorphie est totale et permanente entraînant une anaérobiose à peu près complète du profil.

La matière organique est du type tourbe mal décomposée ; elle représente plus de 31 % du sol sur 40 cm si la matière minérale est argileuse et plus de 20 % si la matière minérale est sableuse.

Localisation et répartition géographique :

Bas-fonds humides et vallées des rivières des zones climatiques I et II, plus rarement de la zone III.

Classification et correspondance :

Classification française	Classification américaine	Classification F.A.O.
Sols à Tourbe fibreuse	Fibrist	Histosols
Sols à Tourbe semi-fibreuse	Lenist	Histosols
Sols à Tourbe altérés	Saprist	Histosols

2.8.2. Les sols hydromorphes moyennement organiques.

La matière organique est de type amoor ou hydromor et ses teneurs varient entre 8 et 30 % sur au moins 20 cm.

L'hydromorphie est totale, mais si elle est permanente, elle est temporaire en surface

Les plus importants d'entre eux sont les sols de mangroves, salés et riches en sulfures. Ils s'acidifient fortement lors du drainage.

Répartition géographique :

Ces sols existent dans toute l'Afrique francophone mais sont répandus dans les zones climatiques I et II (zone équatoriale et zone tropicale assez humide) ; on en trouve cependant sur les rives du lac Tchad.

Correspondance :

Les sols hydromorphes minéraux et moyennement organiques n'ont pas de correspondants exacts dans la classification américaine qui les répartit dans l'ensemble des types de sols.

2.8.3. Les sols hydromorphes minéraux.

Ce sont des sols qui possèdent moins de 8 % de matière organique sur 20 cm. Aussi l'hydromorphie s'exprime surtout par la présence de gley (hydromorphie permanente) ou de pseudo-gley (hydromorphie temporaire) dans la partie supérieure du profil (moins de 1 m de profondeur) et assez souvent dans l'horizon A.

Répartition géographique :

Ces sols existent dans toute l'Afrique intertropicale et sont très fréquents dans les zones les moins humides.

2.9. Les sols peu évolués.

Zones climatiques IIbis et III (régions tropicales semi-humide).

Les sols peu évolués sont en général des sables éoliens ramaniés par le vent ou des alluvions récentes de rivières ; ils sont souvent sableux. Ils peuvent être limoneux ou argileux dans certaines grandes zones d'inondations, autour des rives du lac Tchad ou dans le delta central du Niger. Ils ont alors une tendance à l'hydromorphie.

Zon: climatique II et I (région tropicale humide et zone équatoriale).

Les sols peu évolués sont généralement des alluvions ou des colluvions ; leurs composition physique est extrêmement variable, mais beaucoup d'entre eux sont sableux. Ils passent souvent aux sols à gley.

Une autre catégorie de ces sols provient de l'ablation des sols anciens ; la roche mise à nu donne des sols peu évolués qui, s'ils ne sont pas rajeunis constamment par l'érosion, évoluent rapidement vers le type ferrallitique.

Dans les zones littorales, il existe deux catégories particulières de sols peu évolués :

- des mangroves peu humifères (Sénégal, Guinée),
- les sols de dunes et de cordons littoraux, Sénégal, Côte d'Ivoire, Togo, Dahomey, Congo-Brazzaville.

(Dans certaines régions très humides, certains sols de cordons littoraux très quartzoux sont de type podzoliques).

CHAPITRE I

=====

LA PENETRATION DES RACINES ET LES RENDEMENTS DES CULTURES

=====

EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

=====

Un certain nombre de facteurs physiques agissent sur le développement des racines de la plante et de ce fait sur les rendements des cultures.

En Afrique tropicale francophone, on a surtout étudié l'influence de la différenciation des horizons pédologiques, de la texture, de la structure et de la porosité du sol.

1 - LA DIFFERENCIATION DES HORIZONS PEDOLOGIQUES

=====

Lorsque l'horizon supérieur d'un sol et l'horizon sous-jacent sont très différents, les racines des plantes ont beaucoup de difficulté à passer de l'un à l'autre.

En particulier, les racines pénètrent très difficilement dans les horizons argileux à pseudo-gley (cas fréquent dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés). GODEFROY (1967 b et 1969 a) signale un mauvais enracinement du bananier en Côte d'Ivoire sur des sols ferrallitiques à horizon B très riche en gravillons ferrugineux et, au Cameroun, sur des sols jeunes avec lappilis ou cendres volcaniques cimentés en dalle de 25 à 40 cm de profondeur.

Le passage d'une sous-soleuse brise l'horizon de lappilis et favorise l'enracinement du bananier. La même opération réalisée sur gravillons ferrugineux ne donne aucun résultat pour cette plante.

La technique indigène des buttes pour les cultures de manioc, igname, taro en Côte d'Ivoire (BERGER 1965) et au Cameroun (CATHERINET 1965) est certainement en grande partie due à cette préoccupation de donner à la plante un horizon meuble suffisant car les racines pénètrent difficilement en profondeur.

AUBERT et MOULINIER (1954), MOULINIER (1962) et DABIN (1965) signalent les inconvénients d'un horizon B à gravillons ferrugineux proche de la surface (30 à 50 cm) pour le cacaoyer et le caféier en sols ferrallitiques. Ce dernier auteur donne des précisions concernant la proportion de gravillons par rapport à la terre fine qui devient gênante pour ces plantes en fonction de la pluviométrie.

2 - LA TEXTURE

=====

La texture d'un sol induit un certain nombre d'autres propriétés qui conditionnent la fertilité : ainsi la quantité bases échangeables d'un sol est souvent dans une même "famille" fonction de son taux d'argile. Le pourcentage d'eau utile est, aussi, relativement fonction de la teneur en argile (COMBEAU et QUANTIN 1963 a, OCHS et OLIVIN 1965) au moins pour les sols ferrallitiques.

En outre les sols riches en limon et sables fins ont généralement une mauvaise structure (sols ferrugineux tropicaux). Les exigences des plantes sont très variables selon les espèces et selon les sols et les conditions climatiques du lieu.

En sols ferrugineux tropicaux souvent mal structurés et comportant une proportion importante de limon et de sables fins :

- L'arachide préfère les sols sableux (BOUYER 1954 a) surtout sous faible pluviosité (700 mm dans le centre et l'ouest du Sénégal). En zone un peu plus humide (Tchad, sud du Sénégal) le sol un peu plus argileux (10 % en surface, 15 % en profondeur) convient mieux.
- Le mil au Niger pousse bien sur les sols sableux d'origine dunaire tandis que le Shorgo est cultivé sur les sols plus argileux (NABCS 1966)
- Le Shorgo et la dolique sont de préférence cultivés au Sénégal sur les sols "Dek" un peu plus argileux que les sols Dior à arachides trop sableux (CHARREAU et VIDAL 1962)

En sols alluviaux et vertiques de la vallée du Sénégal, MAYMARD (1957) trouve une corrélation positive entre rendements du Shorgo et teneurs en argile du sol.

En sols ferrallitiques : les teneurs en limon sont toujours faibles (moins de 10 %) et les teneurs en sables fins sont assez irrégulières mais le plus souvent inférieures à celles des sables grossiers, les structures sont habituellement plus favorables à la pénétration des racines que dans les sols précédents.

Aussi l'importance de la texture n'est elle pas primordiale, sauf pour les sols très sableux (moins de 15 % d'argile). Dans ce cas il s'agit plutôt d'une grande pauvreté du sol due à un complexe absorbant réduit à l'extrême et à une faible capacité pour l'eau plus que d'une difficulté de pénétration des racines.

En résumé la texture intervient peu pour l'enracinement et les rendements sauf dans les cas extrêmes (moins de 15 % d'argile ou plus de 60 % d'argile). Les textures convenables ont été étudiées par différents auteurs pour beaucoup de plantes tropicales.

Arachide: MARTIN G. (1959), BRUGIERE (1954),

Palmier à huile : travaux IRHO, OCHS et OLIVIN (1965),

Sisal: BOYER (1956) en République Centrafricaine,

Caféier et Cacaoyer: FORESTIER (1959), MOULINIER (1962) en République Centrafricaine et en Côte d'Ivoire,

Bananier: DUGAIN (1960 a), MARTIN et SIEFFERMANN (1966 a) au Cameroun, DABIN et LENEUF (1960) en Côte d'Ivoire, MAIGNEN (1955) en Guinée.

Quant aux plantes strictement alimentaires, manioc, igname, taro, maïs, riz pluvial, il y a eu très peu d'études concernant l'influence de la texture sur l'enracinement et les rendements en raison sans doute de la plasticité de ces plantes et de l'action prédominante de la nature organique sur les rendements. Mais en général, les plantes à tubercules sont mieux adaptées à des textures légères.

Le riz cultivé en rizières, s'il se contente de textures assez variées (DABIN 1954) ne semble pas supporter plus de 70 % d'argile sans asphyxie des racines (BONFILS et FAURE 1961 au Sénégal) pas plus qu'un excès de sable sauf parfois s'il existe un horizon imperméable à faible profondeur (DABIN 1954).

3 - LA STRUCTURE

=====

De nombreux observateurs ont depuis longtemps reconnu l'importance de la structure pour l'enracinement et le développement des plantes en zone intertropicale ; mais des études précises se sont surtout développées après 1958 grâce au test Hénin permettant de chiffrer l'instabilité structurale des sols (COMBEAU et MONNIER 1961). Comme ce test est peu précis pour les sols sableux (moins de 20 % d'argile) il a été adopté à ce cas particulier par POULAIN (1960) au Sénégal.

Bien que le principale facteur qui conditionne la structure, au moins dans les horizons superficiels, soit la teneur en matière organique et sa nature (MARTIN 1963, COMBEAU et QUANTIN 1964 b), il est certain que dans les sols ferrallitiques le fer libre du sol et le fer lié à l'argile ont un rôle important quoique encore mal connu (MARTIN G. 1963 au Congo, CHAUVEL et MONNIER 1967 au sud du Sénégal, COMBEAU 1964 à propos des limites d'Atterberg des vertisols du Sénégal).

3.1. En sols ferrallitiques, les indices d'instabilité structurale de Hénin sont $I_s = 0,30$ environ sous savans en République Centrafricaine et ces mêmes indices passent à 0,50 et même 0,90 ou 1 sous culture sans apparemment gêner la pénétration des racines (BOYER et COMBEAU 1960, COMBEAU et QUANTIN 1963 b) ; dans la même région, RICHARD (1967 a et b) considère, contrairement à d'autres auteurs que la structure n'est pas un facteur limitant important la culture du cotonnier.

Si dans la vallée du Niari (Congo-Brazzaville) MARTIN (1963) note des dégradations importantes de la structure, l'effet de stérilisation observé semble plus dû à la lixiviation des bases et à la baisse du pH qu'à un mauvais enracinement des plantes.

Toutefois, FAUCK (1956 b) en casamance (sud Sénégal) constate que les rendements en arachide sont presque aussi bons après un riz pluvial qu'après un engrais vert et il attribue ce fait à l'amélioration de la structure provoqué par les racines de cette céréale.

DABIN (1960 et 1964 b) trouve des corrélations assez étroites entre structure, rétention d'eau et fertilité dans les sols de Côte d'Ivoire pour des pluviométries étalées entre 1300 mm et 2000 mm.

3.2. En sols ferrugineux tropicaux riches en limon et sables fins, les structures sont en général médiocres sinon mauvaises (structure continue avec des Is de 1 à 3 et parfois plus. Une amélioration de la structure par enfouissement d'engrais vert et formation d'une structure en "mie de apin" (TOURTE 1965, POULAIN 1965, CHARREAU 1970 a) donne de bons résultats sur l'enracinement du mil, du sorgho et de l'arachide grâce surtout à un effet protecteur obtenu en prolongeant dans le temps l'amélioration de la porosité acquise par labour.

3.3. Dans les rizières irriguées du Mali, COMDEAU et MONNIER (1961) trouvent que l'enfouissement d'un engrais vert n'améliore pas sensiblement la structure du sol, telles qu'il est possible de la juger, mais augmente sa perméabilité (donc sa porosité).

D'une manière générale dans les rizières inondées (sols alluviaux et sols hydromorphes) l'indice de stabilité structurale n'intervient guère sur les rendements selon DABIN (1962) au Niger.

3.4. Sur les vertisols d'Anié-Mono au Togo une jachère de Calopogonium améliore nettement les rendements de la culture suivante (cotonnier). RICHARD (1967 a et b) attribue ce fait à la meilleure structure ainsi obtenue, mais ne donne pas de chiffre pour noter cette amélioration.

4 - LA POROSITE ET LA DENSITE DU SOL

=====
Ces deux valeurs sont très généralement liées par une fonction inverse : plus la porosité augmente plus la densité apparente du sol diminue.

En Afrique tropicale francophone, les chercheurs ont souvent exprimé leurs résultats en termes de porosité.

DUGAIN (1960 a) a montré que, sur sols jeunes formés sur cendres et lappilis volcaniques au Cameroun, il y avait une corrélation positive entre le rendement des bananiers et la microporosité pour l'air (donc une corrélation négative entre rendements et densité); résultats retrouvés par GODEFROY (1967 a) sur des alluvions récentes à

Madagascar : les porosités favorables à l'enracinement du bananier devraient être supérieures à 36 % (capacité pour l'air).

4.1. Utilisant les données établies en zone tempérée, selon lesquelles avec une porosité totale du sol inférieure à 40 %, l'enracinement des plantes se fait mal, BLONDEL (1965) et CHARREAU (1970 a) concluent à la pleine validité de ce chiffre pour les sols de la zone sahélo-soudanaise (sols ferrugineux tropicaux) et pour toutes les plantes qui y sont habituellement cultivées, arachide, mil et sorgho. En outre, ils trouvent que l'augmentation de la densité apparente du sol entraîne une diminution rapide de la densité des racines suivant une relation non pas linéaire mais hyperbolique.

A titre d'exemple (d'après BLONDEL 1965) sur sorgho au Sénégal sur le même type de sol (sol Dek ou intergrade entre sol brun subaride et sol à pseudo-gley)

Densité apparente du sol mesurée après 40 cm de pluie 5 à 15 cm	Porosité du sol mesurée après 40 cm de pluie 5 à 15 cm	Densité des racines après 2 mois de végétation mg par dm ³ 0-40 cm
1,61	41 %	195
1,50	44 %	227
1,48	47 %	321

L'influence favorable de la porosité du sol serait surtout importante pour les plantes à racines fasciculées (maïs, sorgho, riz pluvial, graminées fourragères) ; par contre les plantes à racines pivotantes, comme le cotonnier y seraient nettement moins sensibles au moins dans la zone des savanes recevant moins de 900 mm de pluie. (CHARREAU 1970 a).

4.2. Dans les savanes du centre de la Côte d'Ivoire avec 1700 mm de pluie, BERGER (1964) et LE BUANEK (1970) constatent sur les sols ferrallitiques de Bouake (Argile 25 %, Limon 8 %, Sables fins 15 %, Sables grossiers 51 %) que l'igname ne développe bien ses tubercules que dans le sol ameubli par un instrument agricole, buttes faites à la main ou billons dressés à la machine après labour.

4.3. En Basse Côte d'Ivoire, dans la zone de la forêt ombrophile (2000 mm de pluie) sur des sols ferrallitiques sableux (13 % d'argile de 0 à 15 cm) dont la porosité est normalement supérieure à 40 %, TALINEAU (1970) après avoir étudié des cas d'enracinement défectueux de l'ananas pense que cette limite de 40 % de la porosité du sol y est également valable.

4.4. Dans l'ouest de la Côte d'Ivoire (1800 mm de pluie) région de Man, en sols ferrallitiques de savane, LE BUANEC (1970) a constaté au moment de la récolte, un enracinement du cotonnier plus profond et plus dense avec des porosités de 55 % (densité apparente 1,15) que pour des porosités de 40 % (densité apparente 1,50).

5 -- INFLUENCE DU LABOUR A LA CHARRUE SUR L'ENRACINEMENT ET LES RENDEMENTS

=====

Pendant longtemps en Afrique tropicale francophone, on a conseillé les façons culturales faites avec les outils traditionnels.

Dans les années qui ont suivi la deuxième guerre mondiale (1945-1950), on a assisté à la création de grandes unités de culture mécanisée à la fois au Sénégal et au Congo-Brazzaville.

Par contre, le labour par charrue attelée s'était développé au Mali (cultures irriguées de l'Office du Niger) déjà depuis l'avant guerre ainsi qu'au Sénégal, mais sur une échelle relativement modeste.

Les stations de recherches ont introduit progressivement, depuis une vingtaine d'années, des charrues d'abord à disques puis à socs.

Quant aux procédés de traction, le tracteur est très généralement utilisé dans les centres de recherche ; toutefois, en milieu africain, le labour, lorsqu'il est pratiqué, est effectué à la charrue tirée par des bovins dans la zone tropicale semi-humide sur les sols sableux assez légers (sols ferrugineux tropicaux principalement). La présence de la mouche tsé-tsé interdit l'emploi du bétail dans les zones plus humides ; aussi s'oriente-t-on vers l'utilisation du tracteur dans les cas où la mécanisation est envisagée (Côte d'Ivoire, République Centrafricaine).

Qu'il soit effectué par des bovins ou par un tracteur, le labour a un effet favorable sur le rendement des cultures.

5.1. En zone tropicale semi-humide (sols ferrugineux tropicaux principalement), à Tarna au Niger sur des sols argileux hydromorphes, NABOS (1966) relate qu'en 1955 le labour a permis de tripler les rendements de sorgho (719 Kg/Ha avec labour, 263 Kg/Ha avec préparation manuelle) et qu'en 1966 sur mil le labour les a augmentés de 45 % (1153 Kg/Ha contre 795 Kg/Ha à la main); TOURTE (1955) conseille vivement le travail du sol sur 25 cm de profondeur au Sénégal ; CHARREAU (1970) cite pour la zone sahélo-soudanienne et soudanienne des augmentations importantes de rendement dues au labour :

15 à 201%	du témoin sur sorgho au Sénégal,
37 %	" " " " Mali,
39 %	" " " maïs en Côte d'Ivoire,
33 %	" " " " au Sénégal,
10 à 25 %	" " " cotonnier au Sénégal (région sud),
20 à 50 %	en moyenne, du témoin sur arachide au Sénégal,
16 à 30 %	" " " " " Niger.

Ces auteurs constatent que l'influence favorable du labour à charrue (profondeur moyenne 15 à 25 cm) se manifeste sur tous les types de sol et qu'il est d'autant plus important que le sol est plus argileux ; le fait est particulièrement évident pour les sols hydromorphes argileux et les vertisols (JABIN 1969 pour le Tchad).

5.2. En zone tropicale humide, sols ferrallitiques, les données chiffrées sont moins nombreuses.

Dès 1958, on considérait que sur les savanes de Grimari (1400 mm de pluie) en République Centrafricaine, un seul labour de préparation par charrue à tracteur d'une savane à dominance d'Imperata Cylindrica permettait aux paysans africains d'obtenir 700 à 800 Kg/Ha au lieu de 400-500 Kg/Ha en culture manuelle ; l'effet résiduel de l'amélioration du sol par la charrue n'a pas été mesuré sur les cultures vivrières de seconde année ; il est possible qu'il fut nul.

BERGER (1964) constate à Bouaké, Côte d'Ivoire, qu'un labour à la charrue attelée permet par rapport à la culture manuelle un accroissement en nombre et en taille des buttes consacrées à la culture de l'igname, donc un supplément de rendement en quantité et en qualité (meilleure présentation des produits).

Par contre, dans les zones les plus humides (plus de 1500 mm de pluie), sur défriche forestière, il paraît inutile d'effectuer un labour avant plantation de cacaoyer, caféier, palmier à huile. La porosité étant généralement suffisante, on risquerait alors de détruire un horizon humifère fragile et peu épais.

5.3. Discussion.

Pour expliquer cette augmentation des rendements due au labour à la charrue pour la zone tropicale semi-humide et en savane en général, CHARREAU (1970) l'attribue à une amélioration de la porosité du sol qui favorise la pénétration des racines, amélioration qu'il est impossible de réaliser avec des outils à main, ainsi qu'en témoignent les chiffres suivants (BLONDEL 1965, cité par CHARREAU 1970) :

: Sénégal	: Densité apparente			: Porosité		
	: Houe à main	: Dent de scarificateur	: Charrue à versoir	: Houe à main	: Dent de scarificateur	: Charrue à versoir
: Horizon 5 - 15 cm après 40 mm de pluie						
: Sol Dior-arachides (sol ferrugineux tropical sableux)	: 1,62	: 1,53	: 1,50	: 39	: 43	: 44
: Sol Dek-sorgho (sol brun à pseudo-gley, finement sablo-limoneux)	: 1,61	: 1,50	: 1,43	: 41	: 44	: 47

Malheureusement, après 180 mm de pluie dans ces sols sableux à dominance de sables fins, la porosité du sol revient aux valeurs initiales (CHARREAU 1970 a).

L'enfouissement d'un engrais vert ou d'une jachère verte stabilise un certain temps la porosité acquise pour le labour grâce à la formation d'une structure en "mie de pain" poreuse et relativement stable (TOURTE 1965, BLONDEL 1965) à condition

que la matière végétale soit uniformément répartie dans le sol et non enfouie à la houe par paquets, ce qui peut expliquer certains résultats contradictoires obtenus au Sénégal sur des sols également sableux mais travaillés à la main (GILLIER 1960).

En zone tropicale humide, il n'y a pas eu d'expérimentations aussi précises. Toutefois, en Basse Côte d'Ivoire, sur les sols ferrallitiques formés sur sables tertiaires dont la porosité est normalement supérieure à 40 %, on a remarqué que les racines des graminées fourragères exploitent de préférence l'horizon travaillé par la charrue (0-25 cm) (TALINEAU 1970) bien que la porosité reste bonne dans les horizons inférieurs.

Il en serait de même pour le riz pluvial dont la densité des racines reste homogène sur toute la profondeur du sol travaillé à la charrue même si celle-ci atteint 40 à 50 cm.

Peu de mesures ont été faites pour juger de la permanence de l'amélioration de la porosité au cours du temps ; il est possible toutefois qu'elle se maintienne plus longtemps en sols ferrallitiques qu'en sols ferrugineux tropicaux : en effet, dans les savanes du centre de la Côte d'Ivoire, (1700 mm annuels de pluie) LE BUANEC (1970) a constaté, six mois après labour et après 1000 mm environ de pluie, une amélioration résiduelle de la porosité de 5 à 15 points par rapport aux témoins cultivés à la main.

En rizières irriguées du Mali, il semble que le travail du sol ait pour effet d'améliorer la perméabilité, surtout si on enfouit un engrais vert (COMBEAU et MONNIER 1961) donc la porosité du sol. Il est patent, en tout cas, que les racines du riz utilisent de préférence l'horizon travaillé.

Il est possible que d'autres facteurs interviennent : aération du sol, réoxydation des gley, destruction des mauvaises herbes, etc... Quoiqu'il en soit, si le labour a très certainement une influence favorable sur l'enracinement et les rendements du riz, les causes profondes de cette amélioration restent mal connues (observations faites à l'Office du Niger de 1950 à 1953).

En résumé, dans les sols les plus variés de l'Afrique tropicale francophone (sols ferrallitiques sauf sur défriche forestière, ferrugineux tropicaux, vertisols, sols hydromorphes de rizières), le labour à la charrue donne d'excellents résultats

sur la pénétration des racines principalement en augmentant la porosité du sol. Même lorsque cette porosité est considérée au départ comme satisfaisante, c'est-à-dire supérieure à 40 %, on constate que les racines utilisent de préférence l'horizon labouré.

Toutefois, la faible épaisseur de la couche de sol travaillé (20 cm en général), la formation éventuelle d'une semelle de labour ou la présence en profondeur d'un horizon argileux compact peuvent poser un certain nombre de problèmes (TOURTE 1965 au Sénégal ; AUDRY 1965 au Tchad).

Le procédé de traction utilisé, tracteur ou animaux, importe peu. Mais la puissance développée par un attelage de bovins est généralement insuffisante pour procéder à l'enfouissement d'un engrais vert, même si le sol est léger (sol sableux). "Elle est notoirement trop faible en sol argileux".

6 - INCONVENIENTS DES LABOURS PROFONDS A LA CHARRUE

=====
Dans toute l'Afrique intertropicale on a longtemps pensé que l'emploi de la charrue était dangereux car il accroissait les méfaits de l'érosion et favorisait la stérilisation des sols, en particulier en accélérant la vitesse de décomposition de la matière organique.

6.1. Actuellement, en Afrique francophone, on considère que l'érosion due à la charrue est provoquée par de mauvaises pratiques culturales et en particulier par la tentation de labourer de grands espaces sans tenir compte du relief : des études précises en Côte d'Ivoire (DABIN 1959, BERTRAND 1967), au Dahomey, (VERNEY et WILLAIME 1965), au Sud du Sénégal, (CHARREAU 1969) ainsi que l'expérience des stations expérimentales dans la plupart des États, ont montré que le travail profond du sol était souvent moins générateur d'érosion, et en tous cas pas plus, que les méthodes traditionnelles de culture à conditions de respecter certaines normes : cultures en courbes de niveau, billons, etc...

Quant à la matière organique, les pertes ne sont pas plus importantes qu'en culture manuelle quand l'érosion est jugulée ; en outre, l'enfouissement

des résidus de récolte impossible à réaliser à la main, permet de stabiliser et même d'augmenter le stock d'humus des sols cultivés (LE BUANEC 1970) ou tout au moins d'en limiter la baisse (RICHARD 1967 a et b).

6.2. Par contre, dans deux cas, le labour à la charrue a paru provoquer des modifications graves dans la tenue du sol.

En Basse Côte d'Ivoire, après un labour de préparation à 45 cm de profondeur, on a constaté un tassement si important du sol labouré que les racines de l'ananas n'arrivaient plus à s'y enfoncer ; ce tassement s'est produit en douze jours (BONZON et TALINEAU 1970).

En Casamance (sud Sénégal), on a vu se développer sous culture d'arachide, une imperméabilité quasi-totale de la partie superficielle du sol avec asphyxie des racines (CHAUVEL 1970).

On ne connaît pas la cause de ces deux phénomènes

Dans ces deux cas, on a affaire à des sols travaillés à la charrue à traction mécanique en culture continue depuis plus de 17 ans et sans jachère.

Le fait qu'en Casamance, comme en Côte d'Ivoire, les sols soient très sableux (11 à 15 % d'argile en surface) pourrait laisser supposer qu'il s'agit simplement d'un tassement après destruction par les labours répétés d'une structure (ou pseudo-structure) instable. Mais CHAUVEL et MCNNIER (1967), à propos des sols de Casamance, font remarquer que l'influence du labour sur les propriétés intrinsèques du sol semble se répercuter à une profondeur bien supérieure à celle atteinte par la charrue.

Peut-être est-on en présence d'un phénomène nettement plus complexe qu'un simple tassement ?

En tout cas, il y a là un problème très grave qui commence à apparaître et dont il est urgent de connaître exactement la cause.

6.3. Sur les défriches forestières des zones très humides, le labour profond (à 30 - 40 cm) à la charrue présente de nombreux inconvénients en raison de la répartition très superficielle de l'humus : en cas de cultures arbustives, le labour

semble inutile par la suite ; toutefois, pour les cultures annuelles, l'expérience a montré qu'il est possible d'approfondir progressivement (3 à 5 cm par labour) la couche travaillée du sol avec des résultats convenables ; l'opération doit être réalisée avec prudence.

CONCLUSION

=====

Parmi les caractéristiques physiques du sol qui conditionnent la pénétration des racines, les principales causes qui empêchant un enracinement normal des plantes cultivées sont par ordre décroissant d'importance :

- une porosité du sol inférieure à 40 %,
- une différenciation trop importante des horizons supérieurs du sol, surtout si l'horizon inférieur est formé de gley, pseudo-gley, de gravillons ferrugineux ou d'une nappe de gravats,
- une structure continue (sols ferrugineux tropicaux) qui d'ailleurs fait classer le sol dans les sols à mauvaise porosité ou trop large et compacte (vertisols) donc avec une faible porosité des agrégats.

Si pour les vertisols une jachère doit précéder le travail profond du sol, dans tous les autres cas on peut utiliser directement un instrument puissant de labour (charrue, sous-soluse) qui, en mélangeant les horizons, en améliorant la structure par enfouissement d'engrais vert, de fumier ou de résidus de récolte et surtout en augmentant la porosité permet un meilleur enracinement des plantes cultivées et donc des augmentations importantes de récolte.

Ces résultats sont valables pour toute l'Afrique tropical francophone, les défriches forestières nécessitant des précautions particulières.

Une ombre toutefois à ce tableau : dans deux cas, sur des sols ferrallitiques travaillés à la charrue en culture continue sans jachères depuis au moins 17 ans, on a remarqué que le labour entraînait des inconvénients graves. Il y a là un problème urgent dont il importe de connaître la cause pour trouver une solution.

CHAPITRE II

LE CYCLE DE L'AZOTE ET

LES BACTERIES DU CYCLE DE L'AZOTE

1 - ORIGINE DE L'AZOTE

1.1. Azote apporté par les pluies.

Aucune mesure suivie n'a été faite en Afrique francophone, mais RICHARD (1964) à Addis Abeba a trouvé pendant une année un apport de 9,44 Kg/Ha d'Azote, principalement sous forme ammoniacale, localisé pour plus de moitié pendant les quelques pluies de saison sèche (fait confirmé par MEYER au Congo-Kinshassa).

RICHARD constate que ses résultats sont très voisins de ceux trouvés à Ceylan, en Malaisie et en Cochinchine par KOCH, CORBERT, et lui-même : les quantités varient de 10 à 14 Kg/Ha et par an selon les auteurs.

De son côté, THORNTON (1963) citant JONES, indique pour le Nigéria du nord sous un climat nettement plus sec, que l'Azote apporté par les pluies serait de l'ordre de 50 livres par acre et par an (environ 53 Kg/Ha et par an). Le même auteur trouve 47 Kg d'Azote fixé par Ha et par an en Gambie.

Quoiqu'il en soit, l'Azote apporté par les pluies joue certainement un rôle important (VENEMA 1961) bien que difficile à préciser parce que peu étudié tout au moins en Afrique francophone.

1.2. Fixation aérobie d'Azote atmosphérique par les bactéries du sol.

1.2.1. Jusqu'à présent, les deux principales bactéries fixatrices d'Azote reconnues dans les sols intertropicaux sont :

- Azotobacter chroococcum,
- Beijerinckia indica.

Cette dernière ayant été longtemps Azotobacter indicum (DOMMERGUES 1953 b). En outre certains auteurs ont signalé la présence d'autres bactéries fixatrices de N comme Azotobacter Beijerinckii très résistantes aux pH inférieurs à 6 (citée par MOURARET 1970) et Bacillus circulans à faible pouvoir fixateur de N qui serait présent à forte densité dans les sols de Séfa qu'ils soient sous forêt ou sous savane (CHARREAU et FAUCK 1969). En outre, on a signalé un Azotobacter laticogenes, bactérie acidophile, dans les sols ferrallitiques de la région d'Abidjan (BOQUEL, KAUFFMANN et TOUSSAINT, 1953). Il est probable cependant que l'on peut assimiler Az. laticogenes à Beijerinckia. Bacillus circulans et Azotobacter Beijerinckii n'ont jusqu'à présent pratiquement pas été étudiés en Afrique francophone. Peut-être sera-t-on amené à les assimiler à d'autres germes déjà connus.

1.2.2. Par contre, Azotobacter chroococcum et Beijerinckia indica ont fait l'objet d'un certain nombre de travaux.

Etant que les avis soient quelques peu discordants ou peut-être aient fait l'objet de confusion de genre (DOMMERGUES 1952), on peut considérer que :

- a) Azotobacter chroococcum est plus ou moins neutrophile, les pH favorables se situent de 6 à 8 et qu'il est complètement inhibé au-dessous de pH 5,7-5,9 (LAMOUROUX 1956, DABIN 1953). De fait au Sénégal, si cette bactérie existe sur les types de sols les plus variés, on n'en trouve de fortes densités que sur les sols à pH voisins ou supérieurs à 7, les densités moyennes se rencontrant pour des pH de 6 à 7. Au-dessous de pH 6, Az. chroococcum n'existe pratiquement plus (DOMMERGUES 1960 b).
- b) Beijerinckia indica a été surtout étudiée à Madagascar par des auteurs francophones (DOMMERGUES (1952), MOUREAUX (1959) Beijerinckia étant encore appelé Azotobacter indicum).

D'après une étude faite en Laboratoire par HILGER (1964) sur des sols du Congo-Kinshassa, il ressort que cette bactérie est non seulement acidotolérante comme on le pensait jusque là, mais surtout acidophile : son pH optimum est compris entre 4,5 et 6. En outre, son activité serait inhibé par le Calcium ; d'où sa présence dans les sols tropicaux acides

et désaturés du Congo (HILGER 1964). Pourtant dans les forêts du Congo-Brazzaville, sur un sol ferrallitique fortement désaturé et argileux (40 % d'argile en surface), de BOISSEZON (1961), ne trouve pas trace de Beijerinckia. Il est vrai que le pH est de 4,1.

En basse Côte d'Ivoire, (2000 mm de pluie) sur des sols ferrallitiques sableux (13 % d'argile en surface) très désaturés, les bactéries fixatrices d'Azote sont plus nombreuses sous forêt (pH 4,0 à 4,9) que sous savane de pH 4,4 à 4,9 (BERLIER, DABIN et LENEUF 1956) ; d'après le contexte il semble que seule la savane possède des Beijerinckia indiquées seulement ici comme des "colonies bactériennes à pigments jaunes". Les germes de forêt n'ont pas été identifiés. Peut-être s'agit-il d'oligonéotrophes (KAUFMANN 1951) ?

A Madagascar à propos d'Azotobacter indicum qui est en réalité un Beijerinckia (DOMMERGUES 1953 b), on considère que si cette bactérie peut se développer in vitro pour des pH compris entre 4 et 8, le pH optimum se situerait à 6,2 pour une souche et à 5,6-5,8 pour une autre souche selon DOMMERGUES (1953 a).

Dans les sols on ne trouve jamais de Beijerinckia pour des pH inférieurs à 4,6 et supérieurs à 7 d'après ce même auteur qui ajoute que cette bactérie est rare dans les sols forestiers probablement à cause de leur forte acidité.

Dans les sols cultivés de Casamance au sud du Sénégal (1200 mm de pluie) sur sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux, de pH compris entre 4,5 et 6 et en voie de désaturation en surface (V = 50 à 60 %), CHARREAU et FAUCK (1969) ne signalent qu'une très faible densité de Beijerinckia; à tel point qu'ils se demandent, si de ce fait, on peut lui attribuer un rôle dans le cycle de l'Azote. DOMMERGUES (1956 a) considère que, sur ces mêmes sols, un chaulage ou un apport de phosphate tricalcique (500 Kg/Ha) provoquent un accroissement considérable du nombre non seulement des A. chroococcum mais aussi des Beijerinckia ; l'enfouissement d'engrais vert a une action similaire (DOMMERGUES 1956 b).

De BOISSEZON (1961) sur les sols ferrallitiques désaturés argileux de la vallée du Congo a compté trois fois plus de Beijerinckia après apport de 3 Tonnes/Ha de calcaire broyé (pH 5,9) que sur les sols de savane (pH 4,5).

Les conclusions de ces auteurs semblent contredire quelque peu celles de HILGER, DABIN (1953) comme CHARREAU et FAUCK (1969) pensent que les fumures minérales ont une influence favorable sur l'activité bactérienne, les bactéries pouvant souffrir de carence en P, Mg, Mn, et Fe (DABIN 1953, au Mali).

1.3. Fixation aérobie d'Azote par les algues bleues et vertes.

Bien que les propriétés fixatrices d'Azote des algues bleues (Cyanophycées) soient connues (DE et MANDAL 1956), et bien que des auteurs d'expression française (ANGLADETTE et CHABROLIN 1962 ; DOMMERGUES 1967) aient souvent cité des travaux indiens, égyptiens ou japonais, il n'existe aucune étude détaillée réalisée sur ce sujet en Afrique francophone.

Pourtant DABIN (1953) dans les rizières du Mali, MOUREAUX (1965) et BLONDEL (1970 b) sur les sols éxondés du Sénégal en saison des pluies signalent la présence d'algues qu'ils supposent être fixatrices d'Azote : BLONDEL (1970 b) a même mesuré l'Azote des quelques centimètres de terre sous des plaques d'algues et il y a trouvé des taux de N doubles de ceux des sols voisins.

Rien ne semble avoir été réalisé sur ce sujet en Afrique francophone en dehors de ces rares observations.

1.4. Fixation anaérobie d'Azote par les Rhizobiums des Légumineuses.

Si en Afrique francophone rien n'a été fait sur les Cyanophycées, par contre, un nombre important de chercheurs se sont intéressés aux Rhizobiums des légumineuses : alors que l'on pensait que les légumineuses tropicales étaient généralement dépourvues de nodosités, JAUBERT (1952) et BOUYER (1954) ont signalé au Sénégal des nodosités sur Arachis Hypogea, Voandzeia subterranea et Crotalaria Retusa.

1.4.1. Légumineuses cultivées.

En fait, il semble bien que toutes les légumineuses tropicales cultivées possèdent des nodosités : Vigna unguiculata (JACQUINOT 1967), soja, phaseolus (DENARIE 1968) ; d'autre part, un Rhizobium spécifique parasite une légumineuse déterminée et ceci semble particulièrement vrai pour l'arachide et le soja ;

pour une même espèce de Rhizobium les diverses souches peuvent avoir des pouvoirs de fixation d'Azote bien différents (DENARIE 1968, à Madagascar).

C'est naturellement le Rhizobium de l'Arachide qui a été le plus étudié, au moins en Afrique occidentale.

- 1.4.1.1. Les Rhizobiums qui parasitent l'arachide se trouvent normalement en nombre suffisant dans les sols intertropicaux, ce qui rejoint les observations de SEEGER (1961) au Congo-Kinshassa et de THORTON (1962) en Gambie.
- 1.4.1.2. L'intensité de la fixation d'Azote est variable selon les souches de Rhizobium et selon leur spécificité pour la plante infestée. Ce problème n'est pas particulier à l'arachide mais intéresse la plupart des Légumineuses.
- 1.4.1.3. Sur arachide, tout au moins, le Rhizobium spécifique a besoin d'un minimum de molybdène non pour se développer, mais pour fixer de l'Azote en quantité appréciable. Dans le nord du Sénégal où les sols sont carencés en Molybdène, on mélange actuellement un peu de Molybdate d'ammonium aux produits anticryptogamiques destinés à la désinfection des semences (MARTIN et FOURNIER 1965).
- 1.4.1.4. Le pH du sol conditionne étroitement la survie des Rhizobiums et l'infestation des racines de la plante-hôte. BLONDEL (1970 a) a montré en sol ferrugineux tropical (Diox) du Sénégal (4 % d'argile, pauvre en carbone organique 0,29 %) que le seuil d'activité des Rhizobiums de l'arachide était pH 5 : l'optimum se trouvant apparemment entre 5,5 et 6,5. A des pH égaux ou inférieurs à 5, le Rhizobium survit mal en sol Diox et ne peut former de nodosités sur arachide. Par contre, une baisse accidentelle du pH du sol n'a aucune action sur l'existence d'une nodosité déjà formée et l'intensité de la fixation d'Azote atmosphérique.
- 1.4.1.5. Ce seuil d'activité des Rhizobiums serait variable selon les sols : en Casamance sur des sols faiblement ferrallitiques et ferrugineux tropicaux un peu moins sableux (9 à 15 % d'argile) avec un taux toujours faible de carbone organique (0,36 % en terres cultivées), on observe une formation normale de nodosités à pH = 4,5 due sans doute à l'effet protecteur des

colloïdes du sol vis-à-vis des bactéries. A noter que le fumier de ferme pourrait peut-être avoir un rôle protecteur similaire (BLONDEL 1970 a) en élevant localement un pH trop bas. Les seuils d'activité des Rhizobiums sont donc variables pour chaque type de sol (et peut-être pour les différentes variétés de Rhizobiums).

1.4.1.6. Les Rhizobiums des légumineuses ne prolifèrent et n'ont une activité normale que s'ils sont convenablement alimentés en éléments minéraux et en particulier en phosphore, élément souvent déficient dans les sols africains, d'où l'intérêt d'une fumure phosphatée pour activer la fixation symbiotique de l'Azote (JACQUINOT 1967 sur Vigna Unquiculata au Sénégal).

Il est possible également que, dans les sols de Casamance, l'abaissement du taux de Calcium échangeable au-dessous de 1 milliéquivalent pour 100 g de terre soit néfaste au Rhizobium de l'Arachide, FAUCK (1956 a) constate une diminution des rendements au-dessous de ce chiffre de Ca échangeable.

1.4.2. Légumineuses spontanées.

On possède très peu de renseignement sur les Rhizobiums des légumineuses spontanées pourtant abondantes en Afrique francophone.

En basse Côte d'Ivoire, les nodosités sont rares chez les Césalpiniées mais on en trouve fréquemment chez les Papillonacées et les Mimosées d'après BERLIER (1958) ; cet auteur constate que la formation de nodosités est constante sur les plantes poussant dans les jachères et au bord des pistes et chemins mais qu'elle est beaucoup plus rare en forêt et il attribue ce fait à un effet inhibiteur du "climax" forestier sur les Rhizobiums.

Au Sénégal, JUNG (rapport ronéoté Dakar 1958) n'a découvert que de rares nodosités en pépinières sur Acacia albida mais aucune sur les arbres adultes formant bocage dans les campagnes Serères. Pourtant CHARREAU et VIDAL (1965) avaient précédemment constaté un fort enrichissement du sol en Azote sous les acacias.

1.5. Fixation anaérobie d'Azote par les Clostridiums.

Ces germes n'ont pas été spécialement étudiés mais leur présence a été constamment reconnue tant au Sénégal qu'à Madagascar.

On ne sait rien sur leur écologie dans les sols tropicaux d'Afrique francophone, mais on peut supposer, en se fiant aux travaux australiens en particulier, que leur rôle de fixateur d'Azote atmosphérique est important et sans doute plus important que celui des bactéries aérobies.

2 - QUANTITES D'AZOTE ATMOSPHERIQUE FIXEES PAR LES BACTERIES ET LES ALGUES

=====

2.1. Bactéries du sol, Azotobacter, Beijerinckia, bien que l'existence de ces bactéries ait été reconnue depuis un certain nombre d'année en Afrique (BOUYER 1951, 1954 au Sénégal, DABIN 1953 au Mali, DOMMERGUES 1952 à Madagascar, BOQUEL, KAUFFMANN et TOUSSAINT 1953 pour la Côte d'Ivoire), aucune évaluation de l'Azote fixé dans le sol n'a été faite jusqu'à ce jour. BOUYER (1952) estime cependant que la microflore totale des sols à arachide est numériquement inférieure à celle des sols tempérés (30 à 70 % seulement de grains de terre positifs à l'Azotobacter au Sénégal dans les terres à arachides).

DABIN (1953) confirme que les Azotobacter ont une faible activité dans les sols du delta central du Niger (Mali) et il explique ce fait par une carence en phosphore qui affecterait ces micro-organismes.

On peut supposer que les faibles teneurs en matières organiques de beaucoup de sols intertropicaux sont également un obstacle à une activité normale des bactéries aérobies fixatrices d'Azote (déficit énergétique due à une alimentation carbonée insuffisante).

2.2. Algues vertes et bleues.

Aucune étude n'a été effectuée en Afrique francophone, mais il est permis de penser que la fixation d'Azote est loin d'être négligeable si on se reporte aux études étrangères.

2.3. Rhizobiums des Légumineuses.

TOURTE et al (1964) sur arachides au Sénégal en sol ferrugineux tropical (Sol Dior) évaluent la quantité d'Azote fixé par les nodosités à 110-135 Kg d'Azote par hectare.

DOMMERMUES (1967) estime, pour la zone intertropicale en général, et sur les Légumineuses cultivées, que la fixation de N correspond à une fumure azotée de 100 Kg/Ha de N dans les meilleures situations et à 40 à 50 Kg/Ha de N le plus souvent.

DENARIE (1968), à Madagascar, considère comme un minimum une fixation de 60 Kg/Ha de N par les Rhizobiums de l'arachide, et comme une moyenne 150-200 Kg/Ha de N celle effectuée par les Rhizobiums du Soja (maximum 300 Kg/Ha) avec des souches sélectionnées toutefois.

2.4. Clostridium : aucune donnée n'existe actuellement.

2.5. Ces chiffres sont donc assez variables suivant les auteurs et suivant les régions : on peut cependant en conclure que le gain d'Azote est important et qu'il représente une économie appréciable d'engrais azoté.

Il est toutefois intéressant de comparer ces données avec celles obtenues au Ghana et au Nigéria (Ibadan) bien qu'il s'agisse ici d'Azote global fixé par la jachère :

- Jachère sous savane, 39 Kg de N par Ha et par an, au Ghana (NYE et GREENLAND 1960).
- Jachère nue, 36 Kg de N par Ha et par an, à Ibadan (JAIJEBO et MOORE 1963),
- Jachère en recru forestier, 215 Kg de N par Ha et par an (JAIJEBO et MOORE 1963).

Il paraît certain qu'un nombre important de données manquent pour bien connaître la fixation d'Azote dans les sols.

3 - EVOLUTION DE L'AZOTE DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL

=====

Si en pays tempéré on connaît encore insuffisamment les processus de transformation des Matières végétales brutes en matières organiques évoluées, il en est de

même pour les zones tropicales et l'Afrique francophone ne fait pas exception.

Aussi, dans cet exposé sera-t-il uniquement question des processus de minéralisation de l'Azote organique du sol : ammonification et nitrification.

3.1. Cette minéralisation du fait des conditions de température et d'humidité est incontestablement plus rapide sous les tropiques qu'en régions tempérées, bien que son intensité soit fonction de la teneur en Carbone organique du sol.

FAUCK (1970) en Casamance (1200 mm de pluie) cite des chiffres de :

- 1 Tonne/hectare de matière organique minéralisée par hectare et par an sous culture pour des teneurs en carbone organique de 0,38 % de 0 à 30 cm, soit un coefficient annuel de minéralisation de 3,3 % environ.
- 2 Tonnes de matière organique minéralisée par hectare et par an pour des teneurs moyennes en carbone organique de 0,5 % de 0 à 30 cm de profondeur, soit un coefficient annuel de minéralisation moyen d'environ 4,7 % par an, ceci sous forêt sèche.

A noter que ces deux sols paraissent avoir trouvé un équilibre organique, peut-être précaire pour le premier, grâce à l'enfouissement des résidus de récoltes (FAUCK, MOUREAUX et THOMANN 1969), très stable pour le second, avec les débris végétaux de la forêt.

Le défrichement de ces sols forestiers a provoqué en deux ans de culture une minéralisation d'environ 40 à 50 % des matières organiques initialement présentes, soit un taux de dégradation moyen de 20 à 25 % par an (FAUCK 1955; FAUCK, MOUREAUX et THOMANN 1969).

3.2. Ammonification des substances organiques.

Les germes ammonifiants sont présents dans les sols tropicaux : non seulement les matières organiques humifiées sont ammonifiées normalement partout, mais des produits, tels l'urée ou la cyanamide, ajoutés comme engrais azotés sont immédiatement transformés dans le sol.

3.2.1. Le dessiccation du sol n'empêche pas l'ammonification de se poursuivre jusqu'à des humidités extrêmement faibles, variables suivant les types de sol mais pouvant aller jusqu'à des pF supérieures à 4,9 (DOMNERGUES 1967).

Elles ne semble pas non plus inhibée par un excès d'eau (MOUREAUX 1967) ; de

fait elle se produit normalement en rizières (DABIN 1954 au Mali).

A propos de seuils d'ammonification en fonction de l'humidité du sol, DOMMERGUES (1962) fait remarquer qu'il peut varier aussi suivant la forme de l'Azote : N sous forme d'urée, N organique de l'humus, N organique des débris végétaux.

3.2.2. Quant à l'influence du pH du sol sur l'ammonification, comme cette transformation est réalisée par un nombre considérable d'espèces, bactéries ou champignons (POCHON et BARJAC 1958), elle serait assez peu sensible à l'acidité du sol.

Toutefois DABIN (1954) considère qu'elle est très ralentie dans les rizières du Mali pour des pH inférieurs à 5 et qu'elle s'accroît fortement si le pH passe de 5 à 6.

Cette observation doit sans doute être rapprochée du phénomène d'accumulation de matières organiques, par suite d'une très lente décomposition, dans les zones forestières du Congo-Brazzaville et du Gabon, sur des sols à pH inférieurs à 4,5 et souvent compris entre 3,5 et 4,2.

3.2.3. Variations saisonnières de l'ammonification.

La dessiccation du sol suivie de réhumectation favorise, in vitro, d'abord l'ammonification puis, en général, la minéralisation de la matière organique, d'après DOMMERGUES (1960) au Sénégal, confirmant ainsi les travaux faits en Afrique du sud par BIRCH (1958).

C'est un fait que l'on constate une accumulation d'Azote sous forme ammoniacale dans les sols d'Afrique occidentale pendant la saison sèche.

Il ne faudrait pas en conclure à un rythme régulier d'ammonisation tout au long de l'année au moins dans les régions à saison sèche accusée ; l'ammonification est ralentie pendant les périodes sans pluie : humidité insuffisante et en certaines régions à température moyenne plus basse, l'optimum de température se situant vers 40-45° (MOUREAUX 1967) ; s'il existe alors une accumulation d'ammoniac, elle est due à une nitrification nulle ou quasi-nulle et à une utilisation très faible par la végétation alors en vie ralentie.

En région équatoriale humide les rythmes saisonniers sont très atténués ou quasi inexistant.

3.3. Nitrification.

3.3.1. Dans les sols bien drainés et suffisamment humides (au voisinage de l'humidité équivalente), la nitrification succède sans difficulté à l'ammonification.

3.3.2. Influence de l'humidité du sol : Selon DOMMARGUES (1960), la nitrification peut encore intervenir lorsque le sol est déjà fortement desséché ; au Sénégal, le seuil de nitrification est à pF 4,7 pour l'Azote du sol et à pF 4,3 pour le sulfate d'ammoniac selon cet auteur.

Quant à l'optimum d'humidité pour la nitrification, MOUREAUX (1959) à Madagascar trouve qu'il est relativement variable selon les types de sols, mais qu'il est toujours assez voisin de la capacité au champ.

En fait, la nitrification est beaucoup moins tolérante que l'ammonification à la dessiccation du sol.

L'excès d'humidité en créant des conditions d'anaérobiose semble nuire grandement à l'activité des germes nitrificateurs, au moins de ceux qui sont actuellement connus.

3.3.3. Influence du pH.

La nitrification, comme l'ammonification, se poursuit en zone tropicale à des pH nettement plus bas que ce qui a été signalé en zone tempérée ; il est possible que ce soit dû à la grande importance de la flore fongique de la zone équatoriale humide car on a signalé une nitrification provoquée par Aspergillus flavus.

Toutefois, DABIN (1954) attribue, au moins partiellement les bons rendements en riz des rizières du Mali lorsque le pH du sol est voisin de 6, à une forte ammonification tandis que la nitrification reste encore assez faible à ce pH ; lorsque le pH tend vers 7, la nitrification devenant plus intense, les rendements ont tendance à baisser.

Sur des sols de bananeraie au sud-ouest du Cameroun, DUGAIN (1959) constate que la nitrification quasi-nulle à pH 4,3 est normale à pH 6,4.

En basse Côte d'Ivoire, dans la zone de la forêt ombrophile, selon JACQUEMIN et BERLIER (1956), les germes nitreux et nitriques ont une activité moyenne ou assez faible à pH 3,5 et elle augmente considérablement si le pH atteint 4,6 sur différents types de jachères (sol nu, recru forestier) ; assez curieusement ces deux auteurs semblent conclure à une action inhibitrice

inconnue de la forêt (ou d'un recru forestier assez âgé) sur les deux types de bactéries pour des valeurs de pH fort voisines, en forêt ou en savans.

3.3.4. Variations saisonnières de la nitrification.

DOMMERGUES (1960 a et b) a remarqué qu'une dessiccation du sol suivie d'une réhumectation provoquait en laboratoire une augmentation d'Azote nitrique (aussi bien que d'Azote ammoniacal) dans 4 types de sol du Sénégal : vertisol, sol hydromorphe, sol ferrugineux tropical, sol ferrallitique.

Au Sénégal également, MOUREAUX (1967) constate que la nitrification est davantage inhibée que l'ammonification par les hautes températures et la dessiccation du sol ; elle reprend avec intensité dès les premières pluies. Dans la nature, la nitrification est toujours intense au début de la saison des pluies, que ce soit en climat équatorial humide à courte saison sèche (BENAC 1969 au sud-ouest du Cameroun) ou en zone tropicale avec 8 mois d'une saison sèche quasi-absolue (MOUREAUX 1967 et BLONDEL 1970 b, au Sénégal), faits confirmés, in vitro, par MOUREAUX (1959) à Madagascar.

Cette flambée d'activité des germes nitrificateurs, peut être due à une accumulation d'Azote ammoniacal pendant la saison sèche, est de courte durée 1 à 2 mois ; une période de moindre activité lui succède. Par contre, au Sénégal, il s'agirait d'une inhibition complète qui se produirait un mois après le début des pluies (BLONDEL 1970 b) au moins sous culture de Sorgho. Peut être dans ce cas peut-on penser aussi à une action inhibitrice des racines de cette graminée ?

Pendant la saison sèche, longue (5 à 8 mois) et sans aucune pluie des régions sahélo-soudaniennes et soudaniennes, la nitrification est pratiquement nulle (DOMMERGUES 1962), ce qui n'a rien d'étonnant vu l'état de dessiccation quasi-absolu du sol.

Assez curieusement, on retrouve le même phénomène, mais atténué, dans les zones équatoriales où la saison sèche s'accompagne toujours de quelques pluies et où les sols gardent une certaine humidité (BENAC 1969, DUGAIN 1960 au sud-ouest du Cameroun).

Un affaiblissement du pouvoir nitrificateur, in vitro, a même été noté par MOUREAUX (1959) en saison sèche sur des bactéries des rizières inondées de Madagascar.

On peut donc conclure à un rythme saisonnier des bactéries nitrifiantes : forte activité dès les premières pluies, activité ralentie ou nulle ensuite pendant le reste de la saison des pluies, inhibition quasi-complète pendant la saison sèche même en zone équatoriale où cette saison sèche est peu marquée.

4 - DENITRIFICATION ET PERTES D'AZOTE

=====

En Afrique francophone, on ne dispose d'aucune donnée sur les phénomènes de dénitrification dans les sols.

Une étude, au moins, est en cours sur la dénitrification dans les rizières du Sénégal.

Après épandage d'engrais ammoniacal BLONDEL (1967) pense que sur les sols sableux du Sénégal il peut y avoir une perte d'Azote ammoniacal par volatilisation mais que celle-ci reste faible et en tout cas infime par rapport aux pertes dues au lessivage.

Sur ce même sol, POULAIN (1970 d) a remarqué que la volatilisation des engrais ammoniacaux se produisait de façon sensible lorsqu'un chaulage avait relevé le pH aux environs de pH 8.

5 - CONCLUSION

=====

Malgré un nombre appréciable de données sur les bactéries du cycle de l'Azote en Afrique francophone, les renseignements fournis par les divers auteurs sont encore très fragmentaires.

Les Rhizobiums des légumineuses cultivées ont été peu étudiés sauf ceux de l'arachide et du soja : même pour ces derniers bien des points restent obscurs comme leur résistance aux bas pH ou le rôle exact du Molybdène dans l'activité symbiotique, etc... On ignore à peu près tout des Rhizobiums des légumineuses spontanées.

Pour les bactéries fixatrices de l'Azote, on connaît peu de choses en définitive sur leur écologie, car les données obtenues sont souvent incomplètes ; il paraît toutefois certain qu'Azotobacter chroococcum supporte mal des pH inférieurs à 6 tandis que Beijerinckia est plus tolérant à l'acidité du sol, malgré des chiffres de pH assez différents selon les auteurs (pour Beijerinckia notamment).

Pour ces deux bactéries faut-il incriminer l'acidité du sol ou la pauvreté en cations des sols trop acides ? on ne sait !

Quel est le rôle quantitatif exact de tous ces germes sur la dynamique de l'Azote dans les sols tropicaux ? Quelques chiffres fragmentaires ont été donnés pour les Rhizobiums de l'arachide et du soja, mais on ne sait rien sur les quantités d'Azote fixées par les bactéries aérobies et les Clostridium.

Il faudra certainement attendre des études par spectrométrie de masse avec l'Azote 15 pour avoir des renseignements sûrs.

Quant aux bactéries ammonifiantes et nitrifiantes, on peut dégager quelques faits :

- présence constante de ces germes dans les sols tropicaux,
- tolérance plus grande des bactéries ammonifiantes que des bactéries nitrifiantes aux bas pH à la dessiccation du sol et aux températures élevées,
- rythme saisonnier des bactéries nitrifiantes plus net que celui des bactéries ammonifiantes.

En définitive, cet ensemble pourtant important de connaissances cache mal une ignorance certaine concernant :

- l'écologie des fixateurs d'Azote aérobies et anaérobies,
- leur efficacité réelle en quantité d'Azote fixé, *in situ*, selon les espèces et les souches,
- le rôle joué par les algues et les Clostridium dans la fixation d'Azote.

C H A P I T R E I I I

L'AZOTE, LES PLANTES CULTIVEES

ET L'UTILISATION DES ENGRAIS AZOTES EN AFRIQUE TROPICALE FRANCOPHONE

1 - BESOINS EN AZOTE

1.1. Pratiquement, sur tous les sols d'Afrique tropicale francophone les cultures réagissent aux engrais azotés.

Le cas est particulièrement frappant pour les sols jeunes formés sur cendres volcaniques du sud-ouest du Cameroun, sols d'une richesse exceptionnelle pour l'Afrique : 1 à 6,8 % d'Azote total dans l'horizon supérieur ; BENAC (1965) y observe que les rendements du Coffea arabica croissent linéairement avec les apports d'Azote et que 103 g d'Azote (sous forme de sulfate d'ammoniac) par arbre permettent d'obtenir 4803 Kg de cerises fraîches à l'hectare au lieu de 1704 Kg au témoin.

Dans l'immense majorité des sols de l'Afrique de l'ouest, on considère que des taux d'Azote total de 1 à 2 ‰ sont très satisfaisants et que les teneurs de moins de 1 ‰ d'Azote total sont les plus fréquentes.

Sur terre de Barre du Dahomey, pour un même pH du sol (pH 6), les rendements en manioc passent de 30 T/Hectare à 60 T/Hectare si le taux d'Azote du sol croît de 0,5 ‰ à 1 ‰ (DABIN 1956). Au Mali, sur sols irrigués, les rendements en riz et coton sont sensiblement proportionnels à la teneur en Azote total du sol, entre 0,1 et 1 ‰ de N total, (DABIN 1954).

Cette proportionalité entre Azote total du sol et rendements tient au fait que "le coefficient de minéralisation semble assez constant pour les divers types de sols et les divers niveaux d'Azote total" (CHARREAU et FAUCK 1969).

On retrouve la même relation entre les rendements et l'Azote minéral

apporté par les engrais. Parmi bien d'autres exemples, on peut citer :

- Au Niger sur Mil et Sorgho (NABOS 1966),

Azote unités	Mil Kg/Ha	Sorgho Kg/Ha
25	1581	1736
50	1772	1903
75	1925	2040
100	1869	2146
125	1950	2059

- Au Sénégal, la fumure azotée du mil et sorgho permet d'obtenir des rendements de 2 Tonnes/Ha au lieu de 900 à 1000 Kg sans engrais.

- En Haute-Volta, sur rizières, on obtient une progression similaire des rendements en riz de 3880 Kg/Ha à 4900 Kg/Ha grâce à 125 unités d'Azote (DUMONT 1966) :

1.2. En fait dans toute l'Afrique francophone, quels que soient les sols et pour toutes les cultures, l'Azote est toujours le principal facteur limitant pour l'alimentation minérale des plantes. CHARREAU et FAUCK (1969) ont estimé ces besoins pour les cultures du sud du Sénégal ; le sol y fournit 80 à 90 Kg d'Azote par cycle cultural par simple minéralisation de la matière organique et le mil local a besoin de 1,5 Kg de N par jour ; l'azote procuré par le sol correspond donc à une récolte de l'ordre de 2 Tonnes/Ha.

Le riz pluvial, dans les mêmes conditions exige seulement 50 Kg supplémentaires d'Azote apporté par les engrais par hectare, mais les variétés d'origine chinoise récemment introduites ont probablement des besoins nettement supérieurs. (Rendement moyen actuel en riz 4000 à 5000 Kg/Ha).

Le maïs, entre floraison et épisaison, absorbe 4,5 Kg d'Azote par hectare et par jour et le sol est bien incapable de les lui procurer ; aussi pour une récolte de 4 Tonnes/Ha faut-il apporter 100 à 120 unités d'Azote sous forme d'engrais.

Le cas de l'arachide est bien différent : grâce à la fixation symbiotique d'azote, cette plante se suffit à elle-même ; malgré tout, pour aider son démarrage

il est préférable d'apporter au semis 5 à 20 unités d'Azote (SAUGER et GENUYT 1949 ; GILLIER et PREVOT 1960, au Sénégal ; ASHRIF et al. 1962, en Gambie); il en est de même pour Vigna unguiculata au Sénégal (NICOU et POULAIN 1967), (1).

Par contre, en Haute-Volta, et au Niger, on ne met pas d'Azote sur arachide sur des sols de type voisin.

2 - AZOTE DU SOL, pH ET FERTILITE

=====

Les plantes s'alimentent directement en Azote à partir du sol et, surtout dans le cas de l'agriculture africaine qui utilise peu ou pas d'engrais, cet Azote provient essentiellement de l'évolution des matières organiques du sol.

On pourrait donc dire que plus un sol est riche en Azote total, plus les plantes auront la faculté de s'alimenter correctement en cet élément. Encore faut-il que cet Azote organique du sol puisse se trouver sous une forme minérale facilement assimilable et c'est là qu'intervient la réaction du sol, caractérisée par son pH.

En effet, le pH d'un sol a une influence directe sur l'activité des bactéries ammonifiantes et nitrifiantes donc sur la fourniture de cet Azote à partir des matières organiques du sol. Un pH trop bas (inférieur à 4,5-5) ralentit considérablement les phénomènes de minéralisation de la matière organique et diminue donc les quantités d'Azote disponibles.

Un pH élevé (pH 6,5 à 8), s'il ne s'agit pas d'un humus calcique, les accélère et une faible quantité de matière organique pourra libérer une quantité d'Azote importante, (des phénomènes de dénitrification doivent également jouer au moins pour les pH alcalins mais ils sont encore très mal connus).

La fourniture d'Azote aux plantes est donc fonction d'une part des teneurs du sol en cet élément et d'autre part des valeurs du pH qui conditionnent sa mise à la disposition des cultures.

(1) Toutes les comparaisons citées ci-dessus entre rendement et doses d'Azote ont eu lieu après corrections des autres carences, phosphore et soufre en particulier.

3 - LES ENGRAIS AZOTES UTILISES EN AFRIQUE

=====

Dès 1946, les stations de recherche ont expérimenté systématiquement les engrais azotés et ont mis en évidence les besoins importants des plantes cultivées. De nombreuses études avaient été réalisées sur ce point mais de façon plus dispersée.

3.1. Forme des engrais azotés utilisés.

Le sulfate d'ammoniac fut le premier engrais introduit en raison de son prix et surtout de sa faible hygroscopicité et des facilités de manutention (le nitrate d'ammoniaque ayant donné lieu à la fin de la deuxième guerre mondiale à des explosions meurtrières était l'objet d'une suspicion légitime ; il est en outre très sensible à l'humidité).

Aussi, les effets cumulatifs de l'Azote et du Soufre donnèrent-ils lieu à certains quiproquos, de part et d'autre du fleuve Oubangui, entre agronomes français utilisateurs de sulfate d'ammoniac et agronomes belges qui employaient le nitrate de Soude à propos de la fumure du cotonnier. Les seconds n'observaient aucune réponse à l'Azote sur ces terres très carencées en Soufre, tandis que les premiers attribuaient à l'Azote ce qui était en partie redevable au Soufre ; le malentendu fu dissipé définitivement en 1956 (BRAUD 1962).

On a reconnu depuis que de nombreuses autres plantes réagissent favorablement à un apport combiné d'Azote et de Soufre : arachide, mil, sorgho, bananier, caféier... Aussi le sulfate d'ammoniac est-il toujours très utilisé, d'autant plus que l'unité d'Azote n'est pas plus chère que pour les autres formes, tout au moins au port de débarquement.

Les formes plus concentrées d'engrais azotés #, urée, cyanamide, ou combinées avec d'autres éléments de la fumure comme le Phosphate d'ammoniac, sont surtout intéressantes dans les pays où le transport terrestre grève lourdement le prix d'utilisation de l'engrais (Haute-Volta, Mali, Niger, République Centrafricaine).

A la suite de divers essais l'emploi de l'urée, du phosphate d'ammoniaque et, dans une moindre mesure, de la cyanamide semble se généraliser ; l'urée en

particulier jouit d'une faveur certaine auprès des utilisateurs (Bananeraies de Côte d'Ivoire, caféières de République Centrafricaine).

Le nitrate d'ammoniac, trop hygroscopique malgré les progrès du conditionnement, n'est pratiquement pas employé ; on craint en outre un lessivage accéléré (MONTAGUT 1963, aux Antilles sur bananier).

3.2. Valeur agronomique des différentes formes d'engrais azotés.

D'innombrables essais ont comparé les diverses formes d'engrais azotés. Parmi ceux qui ont été récemment publiés, on peut citer : BOUYER (1965) sur riz et sorgho au Sénégal, en Haute-Volta et Madagascar ; NABOS (1966) sur mil au Niger ; COYAUD et LIENARD (1966) sur riz au Niger ; BONO et MARCHAIS (1966) sur riz au Mali ; VERLIERE (1967 a) sur caféier en Côte d'Ivoire ; POULAIN (1967 b) sur arachides au Sénégal, etc...

Tous ces auteurs concluent à l'équivalence de l'urée et du sulfate d'ammoniac lorsque les doses d'Azote sont les mêmes.

Ceux qui constatent une efficacité supérieure du sulfate d'ammoniac l'attribuent au Soufre (BENAC 1965, sur caféier au Cameroun ; POULAIN 1970 a, sur arachide et mil au Sénégal ; BRAUD 1966, sur cotonnier en République Centrafricaine).

Peu d'essais ont été faits sur le phosphate d'ammoniac et le nitrate de calcium (VERLIERE 1967 a, en Côte d'Ivoire), mais on peut en conclure à la même efficacité pour des doses équivalentes d'Azote, lorsque la carence en Soufre n'intervient pas.

Le nitrate d'ammoniac n'a pratiquement pas fait l'objet d'expérimentation sauf sur rizières où a pu être vérifiée la mauvaise assimilabilité de l'Azote nitrique par le riz (COYAUD 1956, au Mali ; ROCHE, VELY et NGO-CHANG-BANG 1967, à Madagascar).

En résumé, on peut donc affirmer l'équivalence agronomique des formes suivantes d'engrais azotés : sulfate d'ammoniac, urée, cyanamide et phosphate d'ammoniac.

Dans le cas fréquent des carences en Soufre, le sulfate d'ammoniac est la forme la plus économique d'apport simultané d'Azote et de Soufre.

Les formes concentrées d'engrais, urée, cyanamide, phosphate d'ammoniac peuvent être intéressantes lorsqu'un transport terrestre grève lourdement le prix de revient.

Quant à la toxicité due à l'urée signalée par certains auteurs britanniques dans les sols tropicaux (COURT et al. 1964), elle ne semble pas avoir été constatée jusqu'à présent en Afrique francophone.

4 - L'ACIDIFICATION DU SOL DUE AUX ENGRAIS AZOTES

=====

4.1. Le sulfate d'ammoniac a une action acidifiante certaine sur le sol : cette action est bien connue, aussi trois exemples seront-ils seulement cités.

En Guinée, CHAMPION et al. 1958 et DUGAIN 1959 constatent que le sulfate d'ammoniac apporté au bananier (sols hydromorphes organiques de bas-fonds) provoque une baisse annuelle de 0,20 à 0,25 unité-pH pour chaque fraction de 200 Kg/Ha de N, ceci par rapport au témoin sans engrais (pH initial 4,8).

En Côte d'Ivoire, sur sols ferrallitiques avec des fumures plus modestes 40 g de N par pied, soit 200 Kg de sulfate d'ammoniac par hectare, la baisse de pH n'est que de 0,1 unité-pH en 6 ans par rapport au témoin pour un apport cumulé de 240 Kg de N (VERLIERE 1967 a) pH initial 5,05. Caféier Robusta de Gagnoa.

Au Sénégal (Centre de recherche de Bambey) sur des sols ferrugineux tropicaux très sableux (4 % d'argile) à faible capacité d'échange (T = 3,8 m.é. pour 100 g, V = 60 %) et pratiquement pas tamponnés, un apport de 78 Kg d'Azote (325 Kg de Sulfate d'ammoniac) provoque lors d'une rotation quadriennale engrais vert-arachide-mil-arachide un abaissement supplémentaire de 0,20 unité-pH :

- pH initial..... 6,0,
- pH après 325 Kg de $SO_4(NH_4)_2$ 5,5,
- pH du témoin sans engrais 5,7.

(selon POULAIN 1967 c).

Sur un sol de même type, BLONDEL 1967 b, constate que l'apport en couverture de 100 Kg de N (500 Kg de Sulfate d'ammoniac) fait baisser en 40 h. le pH de la couche superficielle (0-2 cm) de pH 6,4 à pH 4,8 ; 50 Kg de N (250 Kg de Sulfate) provoque une baisse encore impressionnante d'une unité-pH dans les mêmes conditions.

Le sulfate d'ammoniac a donc sur les sols un effet acidifiant indiscutable.

4.2. Les autres engrais azotés acidifient aussi les sols. Les expériences ont surtout porté sur l'urée et la cyanamide (CHAMPION, DUGAIN, DOMMERGUES et MIGNEN 1958, en Guinée ; DUGAIN 1960 a, sur bananier au Cameroun ; MOULINIER 1962, en Côte d'Ivoire sur caféier ; POULAIN 1967 c, sur mil et arachide au Sénégal) ; l'acidification est moins forte qu'avec le sulfate d'ammoniac, mais elle n'en existe pas moins.

Par contre, le nitrate de calcium (VERLIERE 1967 a) et la cyanamide calcique, apportant en même temps Azote et calcium, n'acidifient pas le sol.

4.3. Mécanisme de l'acidification.

Dans un premier temps, l'ammonium libéré par l'urée ou apporté par le sulfate d'ammonium expulse les ions H, Ca, Mg et K du complexe absorbant et ces bases échangeables sont ensuite éliminées par drainage.

CHAMPION et al. (1958) dans les bananeraies de Guinée, constatent que l'apport d'une Tonne de Sulfate d'ammoniac (210 Kg de N) provoque en 10 mois, le départ de 0,07 m.é. de K échangeable dans le sol et ceci quel que soit le niveau du potassium dans le sol (sols ferrallitiques et sols hydromorphes).

GODEFROY, LECOQ et LOSSOIS (1969) au Cameroun, ont comparé au bout d'un an la somme des bases échangeables et le pH d'un sol ayant reçu deux fortes doses de Sulfate d'ammoniac (275 Kg de N et 550 Kg de N).

	Témoin 0 Kg de N	275 Kg de N	550 Kg de N
pH	6,4	6,0	5,1
S.B.E.	21,4	20,2	12,5

L'élimination des bases dans les eaux de drainage semble se faire principalement sous forme de nitrates et surtout de nitrates de calcium : cette hypothèse, avancée par TOURTE et al. (1964) pour les sols sableux du Sénégal n'a pas encore reçu de véritable confirmation ; mais après épandage de Sulfate d'ammoniac, BLONDEL (1967 a) sur ces sols sableux du Sénégal, constate que l'Azote, uniquement sous forme de nitrates, est fortement entraîné en profondeur ; d'après ROOSE et GODEFROY (1968) sous bananier en Côte d'Ivoire, l'Azote apporté sous forme d'urée se retrouve, après 4 jours, à 25 cm de profondeur, transformé en nitrates.

Il semble en tout cas difficile d'incriminer l'ion SO_4 pour la totalité du lessivage des bases : en effet après épandage de sulfate de potassium, on constate que cet engrais est pratiquement sans effet sur le pH (MOULINIER 1962 sur caféier, en Côte d'Ivoire).

D'autre part, après apport de KCl sur des bases lysimétriques, TOURTE et al. (1964) ne trouvent pas au Sénégal une exportation supplémentaire de calcium dans les eaux de drainage.

Sans en avoir la certitude, un faisceau d'observations semble prouver que l'action acidifiante des engrais azotés est surtout due à l'élimination du calcium, et dans une moindre mesure des autres cations, du complexe absorbant sous forme de nitrates dans les eaux de drainage.

Les ions SO_4 du sulfate d'ammoniac favorisent certainement l'acidification des sols, mais l'ion NO_3 apparaît cependant à beaucoup de chercheurs comme le principal responsable de l'appauvrissement en bases du complexe absorbant.

- 4.4. La lixiviation de l'Azote apporté par les engrais est si rapide que l'on conseille d'apporter les engrais azotés en plusieurs fractions en particulier sur les céréales, le caféier, le cotonnier, etc... Sauf peut être dans bananeraies (CHAMPION et PY 1968 ; MARTIN-PREVEL 1969 ; GODEFROY, CHARPENTIER et LOSSOIS 1969), on ne constate jamais d'accumulation d'Azote dans les sols à la suite d'apports d'engrais azotés pendant plusieurs années comme GADET et SOUBIES (1967) l'ont décrite dans les sols tempérés du sud de la France.

5 - COMMENT EVITER L'ACIDIFICATION DUE AUX ENGRAIS AZOTES

5.1. Quelques expérimentateurs ont employé du nitrate de calcium (VERLIERE 1967 a, sur caféier en Côte d'Ivoire) ou de la cyanamide calcique (CHAMPION et al. 1958, en Guinée sur bananiers) ; dans les deux cas, l'apport de calcium réduit ou même supprime l'acidification du sol.

5.2. En culture annuelle quasi-continue sur sol ferrugineux tropical sableux (Dior) du Sénégal, lors d'une rotation quadriennale engrais vert-arachides-mil-arachides, l'apport d'une Tonne de phosphate naturel moulu (500 Kg de CaO) au moment de l'enfouissement de l'engrais vert est capable d'empêcher la baisse de pH due à la culture et aux 190 Kg d'Azote apportés sous forme de sulfate d'ammoniac aux trois plantes cultivées (POULAIN 1967 c).

Aussi, CHARREAU et FAUCK (1969), après avoir préconisé un apport de 500 à 750 Kg de phosphate tricalcique tous les 4 ans sur les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux de Casamance, conseillent-ils de surveiller attentivement le pH et de rajouter chaux et calcaire broyé si l'acidité du sol s'accroît.

5.3. La jachère est le procédé traditionnel pour rétablir les propriétés du sol perturbées par la culture, pH y compris.

Elle est employée pour compenser une évolution défavorable des sols pendant les périodes de culture donc également les baisses de pH.

Elle est encore utilisée largement dans toute l'Afrique francophone à l'heure actuelle.

Mais le temps nécessaire peut être fort long (5 à 10 ans pour 2 à 3 ans de culture) et est en tout cas incompatible avec une agriculture évoluée et productive (nécessité du dessouchage lors de chaque mise en culture) et la pression démographique dans certains pays, ouest du Sénégal, nord du Cameroun, etc...

Le but de tous les travaux actuellement menés est d'arriver à raccourcir cette jachère en la rendant productive (plantes fourragères) et même dans certains cas à la supprimer.

CONCLUSION

=====

Dans tous les sols d'Afrique intertropicale la carence principale est partout l'Azote. Sans apport d'Azote il est impossible d'avoir des rendements élevés pour toutes les plantes cultivées.

Les travaux effectués ont montré que plusieurs formes d'Azote, Sulfate d'ammoniac, urée, cyanamide, phosphate d'ammoniac sont équivalentes, tandis que les formes nitrates, fort peu employées, semblent donner des résultats inférieurs aux premières au moins dans certains cas.

Parce qu'il est relativement bon marché et qu'il apporte le soufre dont manquent beaucoup de sols, le Sulfate d'ammoniac est le plus employé. Malheureusement, si tous les engrais azotés acidifient le sol, le sulfate d'ammoniac est celui qui provoque les plus fortes baisses de pH.

En dehors de la jachère, il semble que les engrais combinés au calcium (Nitrate de Ca ou cyanamide calcique) puisse permettre de remédier à cette baisse de pH comme d'ailleurs les apports de phosphates tricalciques locaux.

Le dernier procédé paraît le plus prometteur grâce à l'apport simultané de phosphore et à son prix abordable.

Mais , lorsqu'on examine de près les aspects de la dynamique de l'Azote dans les sols tropicaux, on en arrive au dilemme suivant :

- Les sols ne possèdent pas assez d'Azote pour assurer des rendements convenables ; il faut donc leur apporter des engrais azotés et, dans beaucoup de cas, du sulfate d'ammoniac de préférence.
- Les engrais ne sont vraiment rentables qu'en culture intensive et plus on intensifie les cultures, plus il est nécessaire d'apporter de l'Azote.
- L'Azote immédiatement entraîné hors du sol par les eaux de drainage avec, comme conséquence, l'acidification par lessivage des bases, probablement sous forme de nitrates pour une grande part.

Ces pertes par lixiviation, sans la moindre accumulation dans le sol, posent un grave problème qu'actuellement on ne sait résoudre qu'en ajoutant encore plus d'Azote,

d'où un entraînement accéléré des bases.

Il est toutefois important de prendre conscience de l'importance de cette question afin de tenter de trouver dès maintenant une solution, solution qui s'avèrera urgente lorsque l'intensification des cultures actuellement exceptionnelle deviendra une nécessité dans un avenir peut être pas très lointain.

CHAPITRE IV

=====
pH DU SOL ET RENDEMENTS DES CULTURES
=====

La plupart des plantes cultivées sous les tropiques sont dans l'ensemble assez tolérantes au pH du sol. C'est le cas, en particulier, des plantes vivrières qui paraissent supporter sans difficulté une gamme de pH allant de 4 à 7,5 (riz, maïs, manioc, arachide, sorgho, etc...).

Toutefois, on a remarqué que les rendements varient assez sensiblement en fonction du pH du sol :

1 - INFLUENCE DU pH DU SOL SUR LES RENDEMENTS DES CULTURES
=====

- Le bananier qui passe pour s'accomoder de pH très bas voit les récoltes augmenter de 82 % (16,9 T/Ha à 30,7 T/Ha) en Guinée lorsque le pH croît de 4,5 à 6 (CHAMPION, DUGAIN, DOMMERGUES, MAIGNEN 1958) l'optimum étant situé entre pH 6 et 7, valeur confirmée par DABIN et LENEUF (1960) en Côte d'Ivoire.
- Le riz irrigué, au Mali, présente les meilleurs rendements à pH 6, (DABIN 1956) (BOUYER et DABIN 1963) bien qu'il supporte assez facilement de pH de 4 à 5 mais au dépens de l'équilibre physiologique de son système racinaire (d'après PONNAMPERUMA et al (1956) à Ceylan ; BONFILS et FAURE (1961) au Sénégal). Une bonne teneur en matière organique du sol peut dans une certaine mesure compenser l'acidité du milieu.
- Le manioc donne un supplément considérable de rendement si le pH passe de 5 à 6 : DABIN (1956) cite pour les terres de Barre du Togo des rendements de 5 T/Ha de racines à pH 5,1 et de 30 T/Ha à pH 6.
- L'arachide préfèrerait les pH de 5,9 à 6 en casamance (FAUCK 1956 a) mais elle y donne encore des rendements acceptables à pH 4,5 (BLONDEL 1970 b) ; toutefois, dans la vallée du Niari au Congo-Brazzaville sur sols ferrallitiques très argileux,

FRANQUIN et MARTIN (1962) remarquent que la culture de l'arachide n'est plus rentable si le pH baisse au-dessous de 4,4-4,5.

- Le cotonnier ne peut tolérer des pH inférieurs à 5,2 à la fois sur les sols ferrallitiques de la vallée du Niari au Congo-Brazzaville (FRANQUIN et MARTIN 1962) et sur les sols vertiques de Bongor au Tchad (MEGIE 1960), chiffre assez voisin de celui de KILIAN (1964) qui, à Madagascar, déconseille la culture du cotonnier lorsque le pH est inférieur à 5,6 (culture de décrue). BOUCHY (1970) en Côte d'Ivoire constate que le cotonnier ne pousse pas pour des pH du sol voisin de 5.

Au Mali, avec irrigation, BOUYER et DABIN 1963 considèrent que les pH voisins de la neutralité sont les plus favorables au cotonnier et donnent l'échelle de rendement suivante :

pH du sol	Rendement en coton-graines
pH proches de 7	2000 Kg/Ha
pH 6,5	1500 Kg/Ha
pH 6	1000 Kg/Ha
pH 5,5	500 Kg/Ha
pH 5,3	300 Kg/Ha
pH 5,1	100 Kg/Ha

- La canne à sucre, pourtant très tolérante puisqu'elle supporte sans trop d'inconvénients des pH allant de 4,0 à 8,9, prélève tout de même des sols relativement neutres de pH compris entre 6 et 8 (FAUCONNIER 1962, GUILLAUME 1962 a et b, ROUZAUD 1962).

2 - CAUSES DE L'ACTION DU pH SUR LE RENDEMENT DES CULTURES

Le pH est une notion synthétique qui dépend de nombreuses propriétés du sol, en particulier de la saturation en bases du complexe absorbant et du taux de matières organiques (OLLAT et COMBEAU 1960). D'autre part, le pH influence directement la vie

microbienne du sol, l'assimilabilité des éléments majeurs et des oligo-éléments ; il est en liaison étroite avec la structure, au moins dans les sols ferrallitiques et les Vertisols (COMBEAU et MONNIER 1961)!

Aussi les causes invoquées par les différents auteurs d'Afrique francophone sont-elles très variables suivant les sols et les cultures.

2.1. Activité des bactéries du sol.

L'activité des bactéries ammonifiantes et nitrifiantes est optimum pour des pH voisins de 6 ou compris entre 6 et 7 et très ralentie ou nulle si le pH s'abaisse à 5 ou en-dessous. Il en est de même pour les fixateurs d'Azote atmosphérique (DABIN 1954, au Mali ; LAMOUREUX 1956, au Togo ; DUGAIN 1959, en Guinée ; DOMMERGUES 1953 b).

Quant au Rhizobium de l'arachide, sa limite d'activité se trouve vers pH 5 dans les sols ferrugineux tropicaux très sableux du Sénégal (Sol Dior) (BLONDEL 1970 a), alors qu'il semble vivre normalement à pH 4,5 dans les sols ferrallitiques un peu plus argileux de Casamance (BLONDEL 1970 b)!

Pour ces auteurs, l'action défavorable des bas pH (inférieures à 5) est liée à la diminution d'activité ou même à l'absence d'activité des bactéries du cycle de l'Azote, donc à une insuffisance d'alimentation azotée de la plante.

Confirmant cette interprétation, DABIN (1954) constate au Mali, que les sols de pH inférieures à 5, 6 réagissent toujours aux engrais azotés, tandis que DABIN et LENEUF (1960) dans les bananeraies de Côte d'Ivoire observent de bons rendements pour des pH de 4,5 à condition que le taux d'azote total soit supérieur à 2,5 % (Sols hydromorphes et ferrallitiques)!

On peut penser à un phénomène de compensation entre les réserves en azote du sol d'une part et la valeur du pH d'autre part (DABIN 1956).

2.2. Teneurs en bases échangeables ou en sels solubles du sol.

- pH trop bas.

FAUCK (1956 a) sur les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux de Casamance (sud du Sénégal) attribue à une teneur du sol égale ou inférieure à 1 m.é. de Ca pour 100 g de terre les baisses de rendement d'arachide lorsque le

pH descend à 5,0 et en-dessous. BACHELIER (1960) trouve une corrélation entre la teneur en bases échangeables et l'activité biologique des sols ferrallitiques. - pH trop élevés.

En Afrique francophone, les pH supérieurs à 7,5 sont généralement dus à la présence de Sodium dans le complexe absorbant : DABIN (1954) au Mali pense à un effet défavorable sur la structure si le rapport Na/Ca est supérieur à 0,03 ; CHEVERRY (1966) constate dans les polders du lac Tchad, lorsque la teneur en sulfate et bicarbonate de Na dépasse 1000 g par mètre carré, que la culture du blé n'est plus possible.

2.3. Toxicité du Manganèse et de l'Aluminium.

Une toxicité manganique a été décelée pour l'arachide sur les sols ferrallitiques argileux désaturés de la vallée du Niari au Congo-Brazzaville à $\text{pH} \leq 4,4$ à 4,5 et le cotonnier à $\text{pH} \leq 5,2$ (FRANQUIN et MARTIN 1962). Au Tchad sur sols vertiques, des pH de 5,2 et inférieurs semblent également provoquer une toxicité manganique (MEGIE 1960). Une toxicité manganique similaire a été constatée sur cotonnier par BOUCHY (1970) dans l'ouest de la Côte d'Ivoire pour de pH de 4,5 à 5.

Une toxicité des ions Al^{+++} pourrait également se produire à ces bas pH : $\text{pH} \leq 5,5$ en Indochine (CASTAGNOL 1950), pH 4 à 5 sur riz en Sierra Leone (TOMLINSON 1957), $\text{pH} \leq 5,2$ au Congo-Brazzaville (MARTIN et PELLOUX 1970).

2.4. Blocage du phosphore sous forme peu assimilable.

Dans le cas des sols fortement acides (pH inférieurs à 5,5) et riches en fer libre, le phosphore se trouve en majorité sous forme de phosphate de fer peu accessible aux plantes (DABIN 1963, 1964 a et 1967). D'autre part, FORESTIER (1960) constate sur caféier en République Centrafricaine que plus le pH s'abaisse, plus il y a insolubilisation du phosphore.

Par contre, dans les sols pauvres en fer libre les composés phospho-aluminiques qui se forment préférentiellement restent utilisables pour la plante même à pH acide 4,5 à 5 (sols ferrugineux tropicaux, sols ferrallitiques lessivés) (DABIN, 1967).

2.5. Inassimilabilité des oligo-éléments.

Lors des apports d'amendements calcaires, il peut se produire des blocages d'oligo-éléments quand le pH se relève brusquement de 4,5 à 6,5 ou 7 : on l'a constaté pour le Zinc sur bananeraie en Guinée (MOITY 1954) et sur cacaoyer en culture en pots (LOUE 1951).

D'après la littérature, le Molybdène nécessaire aux nodosités des légumineuses serait d'autant plus assimilable que le pH serait plus élevé. Cette affirmation semble contredite par les observations de BLONDEL (1970) pour le centre et le sud du Sénégal . MARTIN et FOURNIER (1965) constatent sur arachide que les carences graves en Molybdène se situent surtout au Sénégal dans la zone nord (Louga) ; or précisément les pH des sols y sont assez voisins de la neutralité (entre 6 et 7). Apparemment la cause de cette carence semble plutôt imputable à la surexploitation de ces terres.

CONCLUSION

=====

En Afrique francophone, si la plupart des plantes cultivées supportent assez facilement des gammes de pH allant de pH 4 ou 4,5 à pH 7,5 et même parfois pH 8, la plupart des auteurs constatent une influence du pH sur les rendements des cultures, les pH voisins de 6 ou un peu supérieurs à 6 étant normalement les plus favorables pour obtenir de bonnes récoltes.

L'influence défavorable du pH est indirecte et se produit pour les hauts pH (égaux ou supérieurs à 6,5) par le blocage de certains oligo-éléments ou la présence de Sodium (pH \geq 7,5) pour les bas pH par la diminution ou l'absence d'activité des bactéries du cycle de l'Azote, par des taux trop faibles de Calcium ou des toxicités manganique et aluminique ou encore une insolubilisation du phosphore assimilable.

C H A P I T R E V

=====

APPORT D'AMENDEMENTS CALCIQUES ET CALCO-MAGNESIENS

=====

1 - LES ESSAIS DE CHAULAGE

=====

Ceux-ci ont commencé très tôt en Afrique francophone : dès 1925, on en signale sur les sols à arachide du Sénégal. Plus près de nous SAGOT et BOUFFIL en 1945 ont mis 6 Tonnes de marnes sur les terres surexploitées et pauvres en Calcium de Louga dans le nord du Sénégal : ils n'ont constaté aucune amélioration du rendement en arachide.

En 1953, en Guinée, MARTIN-PREVEL (1953) signale qu'un apport de 400 Kg/Ha de chaux agricole ou 500 Kg/Ha de phosphate tricalcique avant une culture d'ananas a un effet dépressif sur les rendements de cette plante ; et pourtant il s'agit d'un sol ferrallitique acide (pH = 4,7), désaturé et pauvre en bases (S = 1,63 - T = 7 m.é./100 g).

1.1. A la suite d'une baisse de pH survenue après 6 ans de culture mécanisée, on a procédé en Casamance à des apports de chaux agricole (2 Tonnes par hectare) et de phosphate tricalcique (500 Kg/Ha) ; FAUCK (1956 a) constate un relèvement de pH de 5,8 à 6,33 et même 6,53 dans le premier cas, et une stabilisation dans le second cas, alors que dans les parcelles témoins, le pH diminuait de plus d'une demi-unité. Le même auteur constate que chaulage et phosphatage (surtout si l'apport de phosphate tricalcique est combiné avec un engrais vert) provoquent une augmentation des teneurs en Calcium échangeable dans le complexe absorbant des sols. Les essais furent ensuite abandonnés par crainte d'un blocage d'oligo-éléments et surtout à cause d'un prix de revient élevé non compensé par un accroissement de rendement des récoltes (arachides et sorgho).

GILLIER et PREVOT (1960) affirment que sur les terres à arachides du

Sénégal pourtant très pauvres en Calcium et Magnésium (S = 2 m.é.), on n'a jamais observé de réponse à un apport de ces 2 éléments. ASHRIF (1963) aboutit à la même conclusion en Gambie. JACQUINOT (1964) pour le sorgho, TOURTE et al. (1964) sur une rotation arachide-mil-jachère font la même constatation mais jettent un cri d'alarme en mesurant les pertes en Ca et Mg par lessivage et exportation dues aux récoltes.

1.2. En zone tropicale et équatoriale humide sur les sols hydromorphes tourbeux (Histosols) ou ferrallitiques très désaturés (Oxysols) de Guinée et de Côte d'Ivoire, les planteurs de bananiers ont procédé avec succès, depuis au moins 25 ans, à des apports massifs de Calcaires broyés et surtout de dolomie dans le but d'atteindre des pH plus favorables au bananier (pH 5,5 à 6,5) et fournir du Magnésium à cette plante (CHAMPION et al. 1958, en Guinée; DABIN et LENEUF 1960, en Côte d'Ivoire; MDITY 1952, en Guinée et 1961, en Côte d'Ivoire; GODEFROY 1967, en Côte d'Ivoire; ROBIN 1967 à Madagascar). Les doses sont variables mais toujours fortes, plusieurs Tonnes à l'hectare au départ, et souvent 1 Tonne-hectare par an comme fumure d'entretien.

Dans le cas particulier du bananier l'apport d'amendements calco-magnésiens est rentable.

Au Congo-Brazzaville sur les sols ferrallitiques désaturés acides des savanes de la vallée du Niari, étant donné la baisse du pH constatée après mise en culture, les toxicités manganiques et la dégradation de la structure du sol qui ont suivi, on a procédé assez vite à des expériences de chaulage (FRANQUIN 1958 ; MARTIN G. 1963). On a conclu à la nécessité de très fortes doses de Ca O, au moins 7 à 10 T de calcaire broyé par hectare sans être certain de la durée de l'effet bénéfique (MARTIN G. 1961 et 1964).

En zone forestière, il n'y a pratiquement jamais eu d'expérience de chaulage en dehors des bananeraies, ni sur les cultures annuelles, ni sur les plantes pérennes, caféier, palmier à huile, etc... ; on signale surtout des apports de phosphates tricalciques ou bicalciques.

2 - PRISE DE CONSCIENCE RECENTE DE LA NECESSITE D'UN APPORT DE CALCIUM ET DE MAGNESIUM
=====

DANS LES SOLS TROPICAUX
=====

A part le cas considéré comme particulier de la vallée du Niari au Congo-Brazzaville, on avait conclu en Afrique francophone, jusqu'à une date récente, à l'inutilité des apports d'amendements calcaires et calco-magnésiens et dans tous les cas à une opération non rentable (à l'exception de la culture du bananier).

On a pris conscience depuis quelques années d'un certain nombre de phénomènes qui ont fait reconsidérer la question:

2.1. L'intensité des pertes d'éléments par lixiviation et exportation.

En sol ferrugineux tropical sableux du Sénégal (Sol Dior), TOURTE et al (1964), après une étude en bacs lysimétriques, constatent que quelque soit le traitement (jachère nue ou enherbée, culture de mil et arachide) le bilan du Calcium est toujours négatif, malgré des apports importants de Ca O (300 Kg/Ha) sous forme de phosphate tricalcique et de chaux.

En sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire sous une bananeraie déjà amendée par 5,5 T de dolomie (d'où un pH de 5,5 et un coefficient de saturation du complexe absorbant de 70 %), ROOSE, GODEFROY et MULLER (1970) trouvent qu'en trois ans les pertes en Calcium et Magnésium sont respectivement de 75 et 70 % des apports, la majeure partie de ces éléments étant emportée par drainage vertical et oblique (ROOSE et GODEFROY, 1968).

2.2. Les conséquences néfastes de la baisse du pH des sols cultivés.

Bien que les plantes cultivées en Afrique tropicale soient assez tolérantes à l'acidité du sol, les baisses de pH de 6 à 5 et même 4,5 amènent généralement des diminutions importantes de rendement (voir Chapitre pH du sol et rendements). Mais surtout, les bas pH provoquent des accidents graves : toxicité manganésiques (FRANQUIN et MARTIN 1962, au Congo-Brazzaville ; MEGIE 1960, au Tchad ; BOUCHY 1970, en Côte d'Ivoire).

Sur arachide dans les sols ferrugineux tropicaux sableux (Sol Dior) du Sénégal, un pH de 5 entraîne la mort des Rhizobiums d'où un rachitisme par faim d'azote appelé "Nanisme jaune de l'arachide" (BLONDEL 1970 a).

Ce sont surtout ces accidents qui ont attiré l'attention sur la nécessité d'apporter du Calcium (et Magnésium) aux sols cultivés.

2.3. L'importance de la teneur du sol en Calcium échangeable pour certaines cultures comme l'arachide.

Sans constater des carences caractérisées comme la "Maladie des gousses vides" de l'arachide due à des teneurs extrêmement basses du sol en Calcium échangeable (0,04 à 0,08 m.é. pour 100 g de terre) selon WATSON (1964) en Nigeria du nord, FAUCK (1956 a) pense qu'en Casamance une bonne teneur de Calcium échangeable se situe vers 1,5 milliéquivalent pour 100 g pour l'arachide et qu'au-dessous de 1 milliéquivalent les rendements diminuent ; ce que confirme partiellement LACHOVER (1966) dans les sables côtiers d'Israël en indiquant une réponse favorable de l'arachide à l'apport de calcaire lorsque le sol contient 1,3 milliéquivalent de Ca échangeable pour 100 g de terre.

Dans les sols ferrallitiques désaturés de la vallée du Niari, MARTIN G. (1964) pense que l'arachide est d'autant plus sensible au manganèse que les teneurs en Calcium du sol sont plus faibles ; dans ces sols très argileux (60 à 70 % d'argile), un rendement d'une Tonne d'arachide exigerait au moins la présence de 2 milliéquivalents de Ca échangeable.

Quant aux déficiences en Magnésium, on en a surtout constaté sur palmier à huile (JULIA 1962, au Congo-Brazzaville ; TINKLER et GUNN 1962, au Nigéria ; OCHS 1968 b, au Cameroun et au Congo-Brazzaville), sur caféier (LOUE 1962 en Côte d'Ivoire ; FORESTIER 1964, en République Centrafricaine) sur bananier, (MAYMARD 1967, en Côte d'Ivoire).

Le plus souvent, ces carences sont attribuées à un déséquilibre du rapport Mg/K.

Sur les cultures annuelles, on n'a pas encore constaté de déficit caractérisé en Magnésium en Afrique francophone, peut-être parce que ce domaine a été peu étudié.

3 - LES INCONVENIENTS DES APPORTS D'AMENDEMENTS CALCIQUES ET MAGNESIENS PARAISSENT AVOIR
=====

ETE SURESTIMES
=====

3.1. Les blocages d'oligo-éléments n'ont été constatés que pour le Zinc, le Bore et peut être pour le Cuivre (bananeraies de Guinée d'après MOITY 1954 et de Côte d'Ivoire, MOITY 1961 ; CHARPENTIER et MARTIN-PREVEL 1967).

Un excès de Calcium et de Magnésium ne semble pas préjudiciable au moins pour le bananier (MARTIN-PREVEL 1966). Par contre, on doit prendre garde à ne pas déséquilibrer les rapports K/Mg, K/Ca et K/Mg + Ca (DABIN et LENEUF 1960, toujours sur bananier en Côte d'Ivoire).

3.2. La matière organique subit évidemment une dégradation rapide à la suite des chaulages massifs des tourbières (Histosols) où sont cultivés les bananiers de Côte d'Ivoire ; mais on ne sait s'il faut l'attribuer au chaulage ou au drainage.

Lorsqu'il s'agit des sols cultivés et donc déjà fortement appauvris en matière organique du sud ou du centre du Sénégal, les expérimentateurs ne semblent pas avoir remarqué une diminution notable du maigre stock de matière organique (FAUCK 1970, POULAIN 1970 d).

En ce domaine, les expériences n'ont pas été assez nombreuses pour pouvoir tirer une conclusion valable.

4 - LES DOSES D'AMENDEMENTS CALCAIRES DOIVENT ETRE IMPORTANTES ET ASSEZ SOUVENT REPETEES
=====

POUR FAIRE FACE AU LESSIVAGE INTENSE
=====

4.1. Au Congo-Brazzaville, FRANQUIN (1958) et MARTIN G. (1961) constatent que, dans ces sols ferrallitiques désaturés argileux de pH 4,3 à 5,3, deux Tonnes/Ha de chaux agricole (62 % de Ca O, 3,3 % Mg O) relèvent facilement le pH d'au moins une demi-unité pH mais qu'au bout d'une année de culture ce pH est revenu à sa valeur initiale ou même a baissé par rapport à celle-ci.

Sur les sols ferrugineux tropicaux sableux du Sénégal (Sol Dior) à faible capacité d'échange ($T = 2,8$) et acides ($pH = 5,80$), POULAIN (1967 c) conclut qu'une dose de 1,2 T de chaux agricole à l'hectare (780 Kg de Ca O) relève instantanément le pH de 5,80 à 7,7, mais qu'après 3 ans de culture, il est revenu à 6,20 ; dans ces conditions, 300 Kg de chaux agricole à l'hectare (195 Kg de Ca O) permettent à peine le maintien du pH initial.

4.2. Pour pallier la baisse du pH dans les sols cultivés en culture continue de casamance (sud Sénégal), CHARREAU et FAUCK (1969) préconisent les doses suivantes de Ca O en fonction du pH :

pH	Tonnes de Ca O
4,5 à 5,0	2,0 à 2,5
5,0 à 5,5	1,5 à 2,0
5,5 à 6,0	1,0 à 1,5
6,0 à 6,5	0,5 à 1,0

4.3. Aussi, étant donné le coût de cet apport de Calcium par chaulage, a-t-on tendance à préconiser au Sénégal un apport de phosphate tricalcique naturel local à 1 T/hectare (37 % de P_2O_5 , 50 % de Ca O) enfoui avec un engrais vert au début d'une rotation arachide-mil-arachide (CHARREAU et POULAIN 1962 et 1964 ; TOURTE et al 1967) ; cette opération ne relève pas le pH des sols cultivés mais l'empêche simplement de baisser (POULAIN 1967 c) ; elle a l'avantage d'apporter, en plus du Calcium, le phosphore qui manque très généralement dans les sols tropicaux et qui, lui, n'est pas entraîné par lessivage (TOURTE et al 1964, au Sénégal ; ROOSE et GODEFROY 1968, en Côte d'Ivoire ; ROSSE, GODEFROY et MULLER 1970, également en Côte d'Ivoire).

5 - L'APPORT D'AMENDEMENTS CALCIQUES FAVORISE L'ENSEMBLE DE L'ACTIVITE MICROBIENNE DU SOL

=====

5.1. Cette action est évidente en ce qui concerne les sols très acides où les bas pH inhibent la vie bactérienne et a été reconnue par CHAMPION et al (1958) dans les bananeraies de Guinée ; le relèvement du pH au-dessus de 5 par chaulage est également

nécessaire dans le centre du Sénégal pour permettre la formation des nodosités sur arachide.

Ces faits ont été amplement confirmés par VELY, CELTON et ROCHE (1967 a) à Madagascar et DENARIE (1967 a et b, et 1968) également à Madagascar.

5.2. Même lorsqu'il n'existe pas de conditions aussi défavorables, DOMMERGUES (1956) a constaté une forte augmentation des Beijerinckia et des Azotobactere, après apport de chaux ou de phosphate tricalcique dans le centre et le sud du Sénégal ; la même observation fut faite par de BOISSEZON (1961) sur les sols ferrallitiques argileux du Congo-Brazzaville.

Dans ce cas, l'action paraît due à une meilleure saturation du complexe absorbant en Calcium et autres bases : BACHELIER (1960 et 1963) après avoir trouvé une corrélation entre vie microbienne et teneur en bases des sols ferrallitiques de la République Centrafricaine remarque que les engrais minéraux, le fumier ou les paillis sont incapables de maintenir le potentiel d'activité biologique des sols en raison de la lixiviation des bases alors que leur effet favorable sur les rendements des cultures est indiscutable. MOUREAUX et FAUCK (1967) constatent au Sénégal une diminution de l'activité microbienne due à l'entraînement des bases par lessivage (sauf pour les Vertisols).

6 - AUTRES PROCEDES UTILISES POUR CORRIGER L'ACIDITE

- 6.1. On a parfois pensé à utiliser le fumier de ferme pour éviter les inconvénients dus à la baisse du pH mais les quantités nécessaires au moins au Congo-Brazzaville (40 Tonnes/hectare) sont incompatibles avec une agriculture de faible rapport (MARTIN G. 1964).
- 6.2. En culture africaine traditionnelle, la jachère d'assez longue durée ramonte les taux de Calcium et de Magnésium en même temps que la teneur en matière organique ; il y a donc un certain relèvement du pH, mais à longue échéance. (entre 4 et 10 ans de jachère) suivant le niveau de dégradation des sols au départ.

DABIN (1964) constate que 4 ans de jachère à *Pennisetum purpureum* relève la somme des bases échangeables de 0,63 à 2,5 milliéquivalents pour 100 g de sol sur sols ferrallitiques désaturés sableux de basse Côte d'Ivoire.

CONCLUSION

=====

Les inconvénients de la lixiviation des bases et de la baisse du pH ont tout de suite été reconnus dans les sols cultivés mécaniquement de la vallée du Niari au Congo-Brazzaville (sols ferrallitiques désaturés argileux), en raison des toxicités manganiques qui sont apparues très rapidement. Mais, ailleurs en Afrique francophone, on a eu longtemps tendance à considérer ce phénomène comme inquiétant certes à échéance lointaine dans les sols les plus intensément exploités (sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux de Casamance dans le sud du Sénégal) mais sans conséquence pratique immédiate.

Récemment dans la zone arachidière du centre du Sénégal (sols ferrugineux tropicaux sableux dit Dior) un dépérissement de l'arachide est apparu, causé par la disparition des *Rhizobium* lorsque le pH baisse et atteint la valeur pH = 5.

Le problème est donc posé maintenant sur une grande échelle. Lorsque de tels accidents surviennent seul un apport d'amendement calcaire est efficace en relevant le pH.

Par contre, s'il s'agit seulement de prévenir une éventuelle baisse de pH, il paraît suffisant d'apporter une Tonne de phosphate tricalcique naturel associé à l'enfouissement d'un engrais vert ou d'une jachère naturelle verte au début de la rotation quadriennale préconisée au Sénégal engrais vert-arachide-mil-arachide pour éviter une acidification du sol.

Dans la pratique, il semble que le chaulage est surtout important pour combattre les effets secondaires de la baisse du pH (toxicité manganique sur arachide et sur coton, inhibition des *Rhizobiums* de l'arachide, etc...), car les plantes cultivées semblent, dans l'ensemble, assez tolérantes aux faibles teneurs en Calcium du sol.

Toutefois, deux auteurs ont signalé l'importance de ces taux en Calcium sur les rendements en arachide à la fois au Sénégal et au Congo-Brazzaville. Il est donc possible que l'effet favorable d'un pH voisin de 6 (ou supérieur à 6) sur les rendements de beaucoup de plantes cultivées soit dû, au moins en partie, à une bonne teneur en Calcium échangeable du complexe absorbant.

En fait, dans les cas les plus courants, le problème du Calcium présent dans le sol ne peut être dissocié des autres problèmes de fertilité générale (teneur en matières organiques, pH, etc..).

Dans quelques cas particuliers, plantes très exigeantes, sols humifères très acides, risque de toxicité manganique ou aluminique, la nécessité du chaulage apparaît alors.

Actuellement, ce sont surtout les facteurs économiques qui conditionnent l'utilisation massive des amendements calco-magnésiens. Aussi est-il probable que l'emploi en restera faible en culture africaine et ceci pour de longues années.

C H A P I T R E V I

LE POTASSIUM DANS LES SOLS TROPICAUX D'AFRIQUE FRANCOPHONE

ET LE PROBLEME DE LA CORRECTION DES CARENCES

1 - LES TENEURS EN POTASSIUM DU SOL COMPATIBLES AVEC LES CULTURES

1.1. Les teneurs limites en potassium.

Deux teneurs limites ont été reconnues.

1.1.1. Un seuil absolu de carence.

Avec des teneurs inférieures à 0,10 milliéquivalent de potassium échangeable pour 100 g de sol, des carences se produisent sur la plupart des plantes : ananas (MARTIN-PREVEL 1953), bananier (DABIN et LENEUF 1960), cacaoyer et caféier (AUBERT et MOULINIER 1954, BELEY et CHEZEAU 1954, LOUE 1961 et 1962, MOULINIER 1962, FORESTIER 1964), palmier à huile (BOYE 1962, OCHS 1965, IRHO 1968), cotonnier (RICHARD 1967), cultures vivrières diverses surtout céréales (DUPONT DE DENECHIN 1967, BOULET et LEPRUN 1969), arachides (BOCKELEE-MORVAN 1964 et CHARREAU et FAUCK 1969) (pour le manioc, au moins à Madagascar, le seuil de carence pourrait être abaissé vers 0,06 milliéquivalents de K pour 100 g de sol d'après ROCHE, VELLY et JOLIET 1956). Ces observations couvrent les pays suivants : Guinée, Côte d'Ivoire, République Centrafricaine, Cameroun, Haute-Volta, Sénégal. On peut donc conclure à la valabilité de ce seuil pour tous les sols et pratiquement pour toutes les cultures.

1.1.2. Un seuil relatif de carence : même si $K > 0,10$ m.é. pour 100 g de terre, il peut y avoir déficience lorsque la proportion de potassium est inférieure à

2 % de la somme des bases échangeables. Cette limite définie par des auteurs anglo-saxons (WALLANCE 1958) sur canne à sucre, a été confirmée par MARTIN-PREVEL (1966) sur bananeraie aux Antilles et vérifiée partiellement par DABIN (1961) en Afrique francophone.

Ce 2ème seuil est à rapprocher des observations de FORESTIER (1964) qui, pour les caféières de la République Centrafricaine, corrige le seuil absolu de carence en fonction de la granulométrie.

Argile + Limon	Seuil de carence pour le K échangeable
10 %	0,05 m.é./100 g de sol
35 %	0,10 m.é./100 g de sol
70 %	0,40 m.é./100 g de sol

Cette notion de seuil relatif par rapport à la capacité d'échange a été également développée en d'autres pays tropicaux puisque TINKLER (1959) fait intervenir pour les palmeraies du Nigéria les rapport K/T et $\frac{K^2}{T}$.

Il constate que les niveaux critiques pour ces rapport sont respectivement 0,015 et 0,001.

BLANCHET (1958), pour les sols tempérés de la France métropolitaine, confirme entièrement l'importance des rapports K/T ou K/S pour l'alimentation potassique des plantes : le pourcentage minimum qu'il indique pour le potassium ($K = 4 \%$ de S) est le double de celui qui est adopté comme seuil relatif de carence en pays tropical ; mais il faut considérer que l'agriculteur des pays tempérés exige de ses cultures des rendements beaucoup plus importants que ceux auxquels on est habitué sous les tropiques.

Il est vraisemblable que si l'agriculture africaine devient vraiment intensive, on en arrivera à considérer comme un minimum le seuil indiqué par BLANCHET pour les pays tempérés.

1.2. Les équilibres entre Potassium et Magnésium-Calcium dans les sols tropicaux.

1.2.1. L'antagonisme entre Mg et K est bien connu pour les sols du monde entier.

Son importance n'a pas échappé aux chercheurs d'Afrique francophone, mais ceux-ci font intervenir assez souvent, en plus, les rapports Ca/K et $\frac{Ca + Mg}{K}$.

JULIA (1962), étudiant les sols ferrallitiques désaturés fortement argileux (plus de 70 % d'argile en surface) du Congo-Brazzaville, considère que les rapports :

$$\frac{Mg}{K} \leq 2$$

$$\frac{Ca}{K} \leq 5$$

ne sont pas satisfaisants et provoquent chez le palmier à huile un déséquilibre qui se traduit par une absorption excessive de potassium et un déficit en calcium, parfois aussi en magnésium.

DUGAIN (1960) signale que si

$$\frac{Mg}{K} < 3$$

les bananiers deviennent sensibles à la "maladie du bleu" (pourriture des régimes) par excès d'alimentation potassique.

Dans le cas du cotonnier lorsque $\frac{Mg}{K} = 3$ un apport d'engrais potassique provoque une diminution du rendement également par excès d'alimentation potassique (DABIN 1956).

1.2.2. DABIN et LENEUF (1960) considèrent que pour les bananiers en Côte d'Ivoire, le rapport Mg/K doit être compris entre :

$$4 < \frac{Mg}{K} < 25$$

Lorsque ce rapport est inférieur à 4 il y a excès de potassium et carence en magnésium et s'il est ^{supérieur} à 25 il y a carence en potassium.

FORESTIER (1964) est plus exigeant pour les sols à caféier de la République Centrafricaine : les valeurs de Mg/K doivent être comprises entre :

$$2,1 < Mg/K < 3,8 ;$$

pour les valeurs inférieures à 2,1, il y a excès induit de potassium.

Pour les valeurs supérieures à 3,8, il y a excès de magnésium, en général sans carence en potassium sauf si K représente moins de 2,5 % de la somme des bases échangeables.

1.2.3. Les rapports $\frac{Mg + Ca}{K}$ ont été étudiés par MARTIN-PREVEL (1963) et par FORESTIER (1964).

Ce dernier auteur indique pour les sols à caféiers de la République centrafricaine qu'il y a déséquilibre alimentaire pour les valeurs suivantes, elles mêmes fonction de la granulométrie du sol :

$$\frac{Ca + Mg}{K} < 24 \quad \text{Avec Argile + Limon voisin de 10 \% ,}$$

$$\frac{Ca + Mg}{K} < 18 \quad \text{Avec Argile + Limon voisin de 30 \% ,}$$

$$\frac{Ca + Mg}{K} < 12 \quad \text{Avec Argile + Limon voisin de 70 \% .}$$

Ce déséquilibre se traduit par une carence en calcium; ce n'est que si en plus $K > 11$ % de S que l'on constate simultanément un excès de potassium dans les feuilles, accompagné alors d'une carence en magnésium.

Toutefois, on considère que, pour le bananier, les carences en potassium ne se produisent que si :

$$\frac{Ca + Mg}{K} > 40 \text{ à } 50 \quad (\text{MARTIN-PREVEL 1963}).$$

1.2.4. Pour les plantes vivrières, plantes à tubercules ou céréales, les rapports $\frac{Mg}{K}$ ou $\frac{Ca}{K}$ ou encore $\frac{Mg + Ca}{K}$ n'ont pratiquement pas été étudiés.

Pour ces dernières, comme pour les cultures précédentes, une mise au point étayée par des études expérimentales précises semble nécessaire.

Jusqu'à présent, les chercheurs d'Afrique francophone, à quelques exceptions près, se sont appuyés à peu près uniquement sur des observations de terrain confirmées par les analyses de sol et les chiffres connus de rendement pour les plantes cultivées, mais non pas sur des essais systématiques.

1.3. Lorsque la somme des bases échangeables du sol est très basse (moins de 1,0 milliequivalent par exemple), les teneurs en potassium, magnésium et calcium sont si faibles que les rapports $\frac{Mg}{K}$ ou $\frac{Ca + Mg}{K}$ n'ont plus de signification pratique.

Les carences, s'il s'en produit, sont principalement dues à un déficit absolu en un ou plusieurs éléments.

2 - LES TENEURS EN POTASSIUM ECHANGEABLE DES SOLS TROPICAUX ET LES PRINCIPALES CARENCES

=====

2.1. Quel que soit le type de sol, les teneurs en potasse échangeable peuvent être extrêmement variables d'un point à un autre (BOULET et LEPRUN 1969) sur la même unité de sol.

2.2. Sols ferrallitiques.

Les carences les plus importantes en potassium apparaissent sur les sols sableux (au moins en surface) et fortement désaturés (Guinée, Côte d'Ivoire, Cameroun).

Un des exemples les plus spectaculaires de cette carence en potassium des sols sableux est donné par les plantations de palmier à huile de Dabou dans les savanes de basse Côte d'Ivoire : établies sur des sols ferrallitiques sableux très désaturés, pauvres en bases et surtout en potassium ($S = 0,65$ m.é. ; $K = 0,02$ m.é. ; $V = 20$ % en surface), ces plantations, malgré un matériel végétal génétiquement de premier ordre, ne donnaient que des rendements dérisoires, 250 à 300 Kg d'huile par hectare. En mettant 1 Kg de KCl (60 % de K_2O) par arbre et par an (environ 170 Kg/Ha), on a obtenu 2 Tonnes d'huile par hectare soit une multiplication par 7 des tonnages récoltés (BOYE 1962).

Lorsque la texture est équilibrée (20 à 30 % d'argile par exemple), les déficiences en potassium n'apparaissent sur les cultures annuelles qu'après plusieurs années de culture sans apport d'engrais potassique ; ces carences disparaissent alors avec 2 à 4 ans de jachère dans les savanes de République Centrafricaine (BRAUD 1966).

En République Centrafricaine également, mais en zone forestière, la nécessité d'un apport d'engrais potassique n'apparaît sur caféier qu'au bout de quelques années (DEUSS 1967). Néanmoins, les stations de recherches préconisent d'apporter 50 à 100 g de K_2O par pied, sans attendre l'apparition des carences. (LOUE 1957, MOULINIER 1962, BORGET et al. 1963, COLONNA 1964, FORESTIER 1966 en Côte d'Ivoire et en République Centrafricaine).

Sur les sols ferrallitiques désaturés argileux (40 à 80 % d'argile) du Congo-Brazzaville, le potassium est souvent en excès par rapport aux très faibles

teneurs en calcium et magnésium (JULIA 1952).

Quant aux cultures de bananiers et d'ananas, l'exploitation intensive de ces plantes nécessite des apports considérables de potasse au sol (300 à 700 Kg de K_2O par an sur bananier en Côte d'Ivoire).

2.3. Sols ferrugineux tropicaux ou peu évolués de la zone tropicale semi-humide.

Les déficiences en potassium sont relativement rares surtout avec le système cultural africain incluant un temps indéterminé de jachère.

Néanmoins, on a constaté des carences en potasse sur arachide dans le centre du Sénégal sur la "tache de Patar" (BOCKELEEE-MORVAN 1964) ; il est probable que l'on découvrira dans l'avenir d'autres cas semblables en Afrique.

D'ores et déjà, on sait que dans le système intensif de la rotation quadriennale préconisée au Sénégal, engrais vert-arachides-mil-arachide, on doit apporter 60 unités de K_2O au cours des quatre années de culture pour compenser exportation et lessivage (TOURTE et al. 1967) avec de telles rotations; la réponse aux engrais potassiques s'accroît avec le temps (POULAIN 1969).

2.4. Sols hydromorphes.

Dans les sols hydromorphes, la dynamique du potassium est probablement assez différente de celle des sols exondés. En général, l'alimentation des cultures en cet élément y paraît moins facile. Cependant DABIN (1951) n'a jamais enregistré de réponses aux engrais potassiques sur les rizières du Mali, fait confirmé par les travaux postérieurs.

En règle générale, on ne constate pas de carence en potasse dans les rizières irriguées d'Afrique francophone.

2.5. Vertisols : le cas des vertisols doit être mis à part. D'une part, ce sont des sols riches en éléments échangeables de toutes sortes (potassium y compris) et, d'autre part, la fraction argileuse y comporte une proportion appréciable de montmorillonite et d'illite au lieu de kaolinite pour la plupart des autres types de sol.

En outre, ce sont des sols peu étudiés parce que peu utilisés par l'agriculture africaine en zone intertropicale. Dans les rares endroits où ils ont été mis en valeur (Togo), les problèmes de structure et de labour ont pris le pas sur toutes les autres préoccupations.

2.6. Echelle de fertilité pour le potassium dans les sols tropicaux (vertisols exceptés).

Etudiant les sols à bananiers de Côte d'Ivoire (sols ferrallitiques fortement désaturés sableux et sols hydromorphes tourbeux), DABIN et LENEUF (1960) donnent l'échelle suivante de fertilité :

Teneur du sol en K éch. m.é. pour 100 g	Appréciation de la fertilité
< 0,10	Faible
0,10 à 0,20	Médiocre
0,2 à 0,40	Moyenne
0,4 à 0,60	Bonne
0,6 à 1,00	Très bonne

Lorsque les sols sont très sableux (moins de 10 % d'argile) ces chiffres peuvent en gros être affectés d'un coefficient 0,7 à 0,5.

Par contre, si les sols sont très argileux (plus de 60 % d'argile) il est prudent de les multiplier par deux.

Dans les cas, assez rares, où le sol contient plus de 1 milliéquivalent de potassium échangeable pour 100 g de terre, on peut craindre des déséquilibres au détriment de l'absorption de Ca et Mg : il est probable que, sauf si les sols sont exceptionnellement bien pourvus en bases, les rapports $\frac{Mg}{K}$ et $\frac{Ca + Mg}{K}$ atteignent alors des valeurs critiques (LOUE 1962, FORESTIER 1964 sur caféier).

Par contre, lorsque les teneurs en potassium sont tout juste suffisantes pour la plante et bien que les rapports $\frac{Mg}{K}$ et $\frac{Ca + Mg}{K}$ soient équilibrés dans les

sols, un apport d'engrais azotés accroissant l'ensemble des besoins de la plante provoque immédiatement des carences en potassium (BORGET et al. 1963 sur caféier en République Centrafricaine ; FREMOND et VILLEMMAIN 1964 sur cocotier en Côte d'Ivoire). Il semble s'agir dans ce cas d'un problème plus général, celui des variations des teneurs-limite dans le sol en fonction du niveau des rendements demandés aux cultures.

En l'absence d'études précises sur d'autres plantes, on peut considérer ces dernières remarques, faites surtout à propos du bananier, du cocotier et du caféier, comme valables pour l'ensemble des plantes cultivées, cultures vivrières comprises ; mais il serait bon qu'une telle généralisation soit confirmée par des études précises.

3 - PERTES EN POTASSIUM PAR LIXIVIATION DANS LES SOLS CULTIVES

=====
3.1. Sur des sols ferrugineux tropicaux sableux (sol Dior) du Sénégal, TOURTE et al. (1964) étudiant le bilan des bases lors d'une rotation quadriennale jachères ou engrais vert-arachide-mil-arachide, constatent en cases lysimétriques que, sous la faible pluviométrie du lieu, (600-700 mm/an) :

- sous jachère ou engrais vert, les pertes par lessivage sont faibles, 3,9 Kg à 6 Kg/Ha de K_2O ,
- sous culture d'arachide sans fumure potassique ou avec un apport de 50 unités de K_2O , les pertes sont approximativement les mêmes (11 Kg/Ha) dans tous les cas,
- sous culture de mil, même constatation avec ou sans apport d'engrais azotés : pertes 25 Kg/Ha de K_2O , tous les objets ayant reçu 41 Kg de K_2O par hectare sous forme de chlorure de K,
- sous culture d'arachide en 4ème année avec ou sans apport de K_2O (60 Kg/Ha), les pertes sont faibles (3 à 5 Kg/Ha).

Ces auteurs ont remarqué que les pertes en potassium par hectare sous une jachère nue, sont incomparablement plus fortes (14 Kg à 100 Kg de K_2O suivant

les objets) qu'avec n'importe quelle plante : 3,9 Kg de K_2O sous l'engrais vert 6 Kg sous jachère naturelle, 3 à 15 Kg sous arachide, 25 Kg sous mil.

- 3.2. Sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux sableux (11 à 13 % d'argile en surface) de Casamance (sud du Sénégal) : CHARREAU et FAUCK (1969) estiment que le sol a perdu par simple lessivage en 15 ans de culture pratiquement ininterrompue 200 Kg de K_2O par hectare pour l'horizon 0-25 cm, soit en moyenne 14 Kg/Ha de K_2O par an, compte tenu des exportations par les récoltes et des apports, insuffisants, par les engrais.

Cette perte ne se répercute pas sur le K total du sol mais uniquement sur le K échangeable dont les teneurs comprises entre 0,10 et 0,2 m.é. pour 100 g au départ, un peu inférieures à 0,10 m.é. au bout de 6 ans, tombent à 0,01 à 0,05 m.é. pour 100 g de terre au bout de 15 ans.

Sur ces mêmes sols, BLONDEL et POULAIN (1970) arrivent à un chiffre voisin pour le potassium entraîné par drainage sous une culture de maïs : 20 Kg/Ha de K_2O par an. Une carence induite en potassium est d'ailleurs apparue sur ces sols ; elle n'existait pas lors de la mise en valeur 12 à 15 ans auparavant.

- 3.3. Sols ferrallitiques désaturés sableux (13 % d'argile en surface) de la zone de la forêt ombrophile de Côte d'Ivoire: 50 à 60 % des engrais potassiques, apportés à vrai dire à fortes doses (1590 Kg/Ha de K_2O en 3 ans), sont enlevés par lessivage dans une plantation de bananier, d'après les études de ROOSE, GODEFROY et MULLER (1970).

- 3.4. Sols hydromorphes utilisés en culture bananière : des apports de 200 Kg et 400 Kg d'Azote à l'hectare sous forme de sulfate d'ammoniac font tomber les taux de K échangeable de 1,10 m.é. initialement à respectivement 0,95 et 0,93 m.é. pour 100 g de sol (DUGAIN 1959), vraisemblablement par remplacement des ions K par des ions NH_4 et élimination des premiers dans les eaux de drainage et ceci bien que l'engrais soit répandu en 7 fractions chaque année.

- 3.5. Pour les autres types de sols, sols ferrallitiques plus argileux que les précédents, vertisols, on ne possède aucun renseignement sur l'intensité du lessivage.

Il serait pourtant utile de savoir s'il existe des pertes par lixiviation dans les vertisols où le type d'argile est bien différent (montmorillonite au lieu de kaolinite).

4 - FORME DES ENGRAIS POTASSIQUES UTILISES EN AFRIQUE ET LEUR EFFICACITE

=====

- 4.1. L'engrais potassique le plus généralement employé en Afrique francophone est le chlorure de potassium à 60 % de K_2O : il représente, dans 95 % des cas, l'unique forme des apports de potassium sur les sols : il a sur le sulfate de K l'avantage d'un prix plus bas et d'une teneur en K_2O plus élevée.
- 4.2. Un nombre relativement restreint d'expérimentateurs ont comparé sulfate de potassium et chlorure de potassium d'un point de vue strictement agronomique.
- 4.2.1. Sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire, du Cameroun, du Dahomey et du Congo-Brazzaville : on n'a jamais remarqué d'effets différents de K_2SO_4 et de KCl sur le palmier à huile pourtant gros consommateur de potasse, à condition évidemment que les doses de K_2O soient les mêmes dans les deux cas (BACHY, 1968).
- 4.2.2. Sols ferrugineux tropicaux sableux et ferrallitiques peu désaturés sableux du Sénégal : le sulfate de potassium se montre supérieur aux autres formes d'engrais potassique (chlorure de K et métaphosphate de K) uniquement lorsqu'une carence en Soufre est associée à un déficit du sol en potassium. Dès que du Soufre est apporté sous forme de sulfate d'ammoniac ou de Soufre minéral (ou plus simplement lorsque le sol n'est pas carencé en Soufre), l'expérience montre que toutes les formes d'engrais potassiques sont équivalentes (BOCKELEEE-MORVAN 1966)
- 4.3. Acidification du sol par les anions Cl^- et SO_4^{--} .

Bien que beaucoup d'agronomes pensent que cette acidification n'est pas très importante comparée à celle provoquée par la lixiviation habituelle des cations

sous culture, elle n'en existe pas moins.

Peut être l'utilisation du métaphosphate de potasse représente-t-elle la solution !

Jusqu'à présent, le prix de cet engrais paraît avoir découragé les utilisateurs éventuels.

4.4. Le fumier de ferme est habituellement utilisé pour couvrir les besoins en azote des plantes, mais il apporte toujours au sol une importante quantité de potasse.

Il n'a été que fort peu étudiée en Afrique tropicale de ce point de vue : son action sur les rendements est indiscutable mais PREVOT et MARTIN (1964) considèrent qu'elle est due aux éléments minéraux qu'il contient, et donc en particulier au potassium, beaucoup plus qu'à la matière organique.

Au Sénégal, un apport de fumier (20 T/Ha) fait progresser de 67 % les rendements en arachide et de 150 à 300 % ceux de Sorgho (GILLIER 1967); les besoins du sorgho (N et K) étant mieux couverts par le fumier que ceux de l'arachide (S et K).

5 - L'ALIMENTATION POTASSIQUE DES PLANTES ET LE TYPE D'ARGILE

=====

Cette question n'a pratiquement pas été étudiée dans les sols d'Afrique occidentale et centrale pour la simple raison que pratiquement la kaolinite est l'argile dominante dans presque tous les types de sol cultivés.

Toutefois, la présence d'une certaine quantité d'illite dans les sols ferrugineux tropicaux devrait entraîner une alimentation potassique régulière à partir des réserves du sol de même qu'une certaine rétrogradation du potassium apporté par les engrais.

Il est un fait que l'on observe fort peu de ~~carences en potassium~~ dans les sols de ce type et que, sauf exception, on ne constate pas de réponse des cultures aux engrais potassiques, au moins après jachère.

Pratiquement on ne possède cependant que très peu de renseignements sur ce sujet, car les études les plus précises ont surtout porté sur des sols du Sénégal où les teneurs en argile sont si faibles en surface (2 à 13 %) qu'il y est bien difficile de mettre en évidence une action quelconque d'un type particulier d'argile.

Quant aux vertisols où l'argile appartient surtout aux types montmorillonitique et illitique, leurs teneurs en cations quels qu'ils soient étant généralement suffisantes pour ne pas nécessiter de fumures minérales, les problèmes de labour et de structure semblent avoir éliminé tout autre préoccupation dans les rares cas où ces sols sont mis en valeur en Afrique intertropicales.

Sur les sols ferrugineux tropicaux et ferrallitiques de savane où un déficit d'alimentation potassique apparaît après plusieurs années de culture (GILLIER 1960, BRAUD 1966, POULAIN 1969), on constate que quelques années de jachères (2 à 4 ans) suffisent pour rétablir un taux convenable de potassium échangeable, mais on connaît mal le mécanisme qui fait ainsi passer le potassium du sol sous forme échangeable.

CONCLUSION

=====

Les travaux effectués en Afrique centrale et en Afrique de l'ouest permettront à l'heure actuelle de tirer quelques conclusions sur l'importance du potassium dans les sols tropicaux :

- il existe un seuil absolu de carence du sol en potassium (vers 0,10 m.é. pour 100 g de terre) et un seuil relatif ($K = 2\%$ environ de la somme des bases échangeables) ;
- l'importance des rapports Mg/K , Ca/K , $\frac{Ca + Mg}{K}$ est soulignée surtout pour les sols ferrallitiques. Bien que les chiffres donnés varient en fonction des plantes cultivées, on peut considérer que lorsque $Mg/K < 2$ à 3, il y a un risque grave de déséquilibre par excès de K. Quant aux valeurs trop fortes de ce rapport, si on connaît bien le déséquilibre alimentaire provoqué (déficit en K, excès en Ca et Mg), les chiffres donnés sont très variables suivant les plantes cultivées ; par exemple : $\frac{Mg}{K} < 25$ pourrait convenir au bananier et $\frac{Mg}{K} < 3,8$ au caféier.

Quant au rapport $\frac{Mg + Ca}{K}$, les chiffres donnés semblent difficiles à généraliser ;

- toutes les formes d'engrais potassiques sont équivalentes à teneurs égales en K_2O sauf pour quelques cas spéciaux (sols ferrallitiques sableux de Basse Côte d'Ivoire, "tache de Patar" au Sénégal), les sols véritablement carencés en potassium sont assez rares en Afrique.

Mais la culture assez intensive plusieurs années de suite fait apparaître des déficiences en potasse (à l'exception des sols de rizières) que corrigent quelques années de jachère.

Cet ensemble de connaissances ne doit pas dissimuler de larges secteurs où l'on ne connaît pratiquement rien :

- Pourquoi la jachère favorise-t-elle la reconstitution du potassium échangeable dans les sols ?
- Quel est le rôle des différents types d'argile dans la dynamique du potassium sous les climats tropicaux ?
- Est-il possible de combattre la forte lixiviation du potassium dans les sols cultivés surtout lorsqu'on y apporte des engrais ?

En outre, si l'alimentation potassique d'un certain nombre de plantes a été étudiée, palmier à huile, caféier, cacaoyer, cotonnier, arachides, riz, mil, sorgho et maïs, on n'a pratiquement aucun renseignement sur les plantes à tubercules, manioc, igname, taro, dont le rôle est primordial dans l'alimentation en zone humide et qui sont cependant des cultures grosses consommatrices de potasse.

C H A P I T R E VII

=====

LE PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX

=====

Les études sur le phosphore en zone tropicale ont longtemps été handicapées par l'absence d'un procédé analytique approprié : c'est ainsi que les méthodes dosant le phosphore acido-soluble indiquent des chiffres trop faibles, et que celles qui mesurent le phosphore alcalino-soluble donnent des résultats fort difficiles à interpréter.

Aussi, malgré des inconvénients reconnus, les chercheurs ont-ils eu longtemps tendance à ne considérer comme valable que l'analyse du phosphore total, ceci jusqu'à ce que la méthode de fractionnement de CHANG et JACKSON (1957) ait permis de débrouiller le problème.

Actuellement, les chercheurs des pays francophones d'Afrique utilisent, en plus de l'analyse du phosphore total, une méthode de dosage du phosphore assimilable dérivée de la méthode Olsen, mise au point par les laboratoires de l'I.C.R.S.T.S.M.

1 - LES FORMES DU PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX

=====

Les formes du phosphore dans les sols définies par CHANG et JACKSON (1957) sont :

Phosphore soluble

Phosphore lié au calcium

Phosphore lié à l'aluminium

Phosphore lié au fer

Phosphore d'inclusions lié au fer et à l'aluminium

Phosphore lié à la matière organique

Elles ont été retrouvées par DABIN (1963) en Côte d'Ivoire sur sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire, ECUYER et DAMOUR (1964) sur divers sols tropicaux, DABIN (1964-a) sur des sols des Antilles (sols ferrallitiques et andosols), DABIN (1967 et 1970-a)

sur de nombreux types de sols d'Afrique noire et par ROCHE (1967) à Madagascar.

De tous ces travaux, on peut tirer les conclusions suivantes qui, bien que surtout établies d'après les résultats trouvés sur les sols d'Afrique francophone, ne s'en inspirent pas moins largement de travaux étrangers :

- 1.1. Des 6 formes de phosphore présentes dans les sols, seules les 3 premières, P-soluble, P-Ca et P-Al, sont directement assimilables par les plantes dans les sols tropicaux (qui très généralement sont acides et non calcaires), la dernière (P-organique) ne pouvant l'être que lors de la minéralisation de la matière organique. Le phosphore lié au fer n'est pratiquement pas utilisable par les racines en milieu acide et celui qui est contenu dans les inclusions de fer l'est encore moins.
- 1.2. Les proportions relatives des diverses formes du phosphore sont sous la dépendance du pH du sol, du taux de matière organique et, dans une moindre mesure, du type de sol.
 - Pour un pH voisin de 7 (Vertisols neutres, sols ferrugineux tropicaux voisins de la neutralité, sols ferrallitiques faiblement désaturés, sols bruns eutrophes ou sols jeunes formés sur roches basiques), les formes du phosphore sont surtout représentées par le phosphore lié au calcium et, dans une moindre mesure, par le phosphore lié à l'aluminium qui est ici relativement abondant.
 - Pour des pH compris entre 5,5 et 6,8, surtout lorsque le sol est pauvre en calcium (sols ferrallitiques faiblement ou moyennement désaturés, sols ferrugineux tropicaux), le phosphore lié à l'alumine domine le phosphore lié au calcium.
 - Au fur et à mesure que le pH s'abaisse, les formes de phosphore liées au fer et à la matière organique ont tendance à s'élever fortement au détriment des autres formes, P-Al, surtout P-Ca qui est pratiquement négligeable et P-soluble/^{qui}devient nul (Sols ferrallitiques désaturés).
 - Le phosphore organique est, semble-t-il, en relation directe avec les teneurs en matière organique du sol.
Il existe dans tous les types de sol, mais il est surtout abondant dans les sols hydromorphes tourbeux.

1.3. Formes du phosphore dans quelques sols.

Sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire				
DABIN - 1963				
Sols ferrallitiques fortement désaturés pH = 4,5			Sol ferrallitique faiblement désaturé pH = 7	
P ₂ O ₅ p.p.m	Sol érodé	Sol sous forêt	Sol cultivé avec engrais	Sol très fertile
P-soluble	0	0	0	0
P-Al	17,3	28,8	74,2	96
P-Ca	5,75	4,6	14,2	174
P-Fe	138	115	104	17,2
P-Fe (inclusions)	725	483	368	460
P-organique	141	243	299	276

1.4. Reversibilité des diverses formes du phosphore.

Le pH d'un sol peut varier ; aussi, peut-on assister à une modification des proportions relatives des diverses formes du phosphore.

Le phosphore organique se minéralise en même temps que la matière organique et, s'il n'est pas absorbé immédiatement par les plantes, il peut être fixé, préférentiellement, par le fer dans les sols très acides, par l'aluminium dans les sols faiblement acides (pH 6 à 7), par le calcium dans les sols neutres ou alcalins (CHANG et CHU 1961, DABIN 1963).

Il ne faudrait pas croire, cependant, que les formes du phosphore fixées à l'alumine et même au fer soient immuables : la question est d'ailleurs compliquée par le fait qu'il existe pour chacune de ces formes des complexes de stabilité variable et que les complexes formés avec le fer sont plus stables, dans l'ensemble, que les complexes aluminiques.

Après enrichissement par des engrais phosphatés on assiste, avec le temps, en particulier dans les sols acides, à une migration de phosphore vers les formes les plus stables c'est-à-dire les formes ferriques (CHANG et CHU 1961, confirmé par DABIN 1963 et 1964-a pour la Côte d'Ivoire et les Antilles).

Il n'est pas exclu, non plus, qu'un accroissement du pH ou un enrichissement en matières organiques ne puisse provoquer une solubilisation du phosphore lié au fer, y compris celui qui est inclus dans les concrétions ferrugineuses (DABIN 1968).

2 - LES TENEURS EN PHOSPHORE DES SOLS TROPICAUX ET LES PLANTES CULTIVEES

=====

2.1. Les sols d'Afrique francophone souffrent, dans l'ensemble, de graves carences en phosphore.

Au colloque sur la fertilité des sols tropicaux de Tananarive, le RAPPORT de SYNTHESE du groupe II-1 (1967) dressant la liste des sols exceptionnellement riches en phosphore (plus de 200p.p.m de P_2O_5) assimilable mentionne seulement en Afrique francophone :

- les sols de Diéri dans la vallée du Sénégal (Mauritanie)
- la région de Dori (Haute-Volta)
- la région de Bebedjia (Tchad)
- les terres de Barre du sud du Togo et du Dahomey
- Quelques sols volcaniques jeunes du Cameroun

On pourrait ajouter la région de Tarna au Niger et celle de Thiès au Sénégal.

Et encore cette richesse en phosphore ne peut-elle, le plus souvent, supporter des cultures trop fréquentes sans s'épuiser (terres de Barre).

Par contre, les cartes indiquant des carences en phosphore (et en d'autres éléments) sont nombreuses :

Sénégal : carte des fumures pour arachide

République Centrafricaine : carte des déficiences minérales pour la culture cotonnière (BRAUD 1962 et 1967)

Sud-Ouest du Cameroun : carte des déficiences minérales (VALET 1967 a et b)

Dans un travail de synthèse, MARTIN G. - I.R.H.O. (1964) montre que l'apport de phosphore est fondamental pour la culture de l'arachide ; sont particulièrement concernés les pays suivants d'Afrique francophone : République Centrafricaine, Haut-Volta, Dahomey, Sénégal.

Si l'on essaie de juxtaposer ces renseignements en fonction des types de sol, on s'aperçoit rapidement que la richesse du sol en phosphore total et, partiellement en phosphore utilisable pour les cultures, dépend principalement de celle de la roche-mère : c'est ainsi que l'on a découvert des gisements de phosphates naturels dans le sous-sol de la "tache de Thiès" (sols ferrugineux tropicaux sableux) et dans celui des terres de Barre du Togo (sols ferrallitiques sablo-argileux), deux régions où les agronomes avaient constaté que les engrais phosphatés ne "marquaient" pas.

2.2. Les teneurs limitées en P_2O_5 total.

Devant les chiffres incohérents et si faibles qu'ils en sont ininterprétables du phosphore dit assimilable soluble dans l'acide citrique ou sulfurique dilué (TRUOG), les chercheurs furent amenés à doser le phosphore total qui avait l'avantage de donner des corrélations significatives avec les rendements des plantes cultivées, au moins dans des types de sol déterminés.

BCUYER et al (1955) indiquent que, dans les sols à arachide du Sénégal (essentiellement sols ferrugineux tropicaux), on obtient :

50% du rendement maximum possible avec 50 p.p.m de P_2O_5 total dans le sol

90% du rendement maximum possible avec 130-140 p.p.m de P_2O_5 total dans le sol

LOUE (1961) et MOULINIER (1962) préconisent des fumures phosphoriques diversifiées en fonction des teneurs en phosphore total du sol pour les cacaoyères et caféières de Côte d'Ivoire (sols ferrallitiques).

Sur les sols ferrallitiques moyennement désaturés (formés sur schistes) de basse Côte d'Ivoire (1800mm de pluie), MOULINIER (1962) compare rendements en

cacaos et teneur du sol en P_2O_5 total :

P_2O_5 total du sol ‰	Rendement en cacao Kg/Ha
0,15	100
0,25	300
0,35	600
0,45	800

Dans les sols ferrallitiques faiblement et moyennement désaturés du Centre de la Côte d'Ivoire (1500mm de pluie) on a pu établir l'échelle de fertilité suivante en culture cotonnière (BERGER 1964) :

P_2O_5 total	Appréciation de la fertilité
< 0,4 ‰	Sol pauvre
0,4 à 0,7 ‰	Sol médiocre
0,7 à 0,9 ‰	Sol moyen
> 0,9 ‰	Sol riche

Dans les sols de fertilité moyenne, le taux d'azote total varie de 0,8 à 1,4‰ tandis que le pH reste faiblement acide (6,3 à 6,5).

Les résultats, fort utiles, de ces travaux ne sont valables que pour un type de sol déterminé et, en particulier pour des teneurs équivalentes en matière organique.

Une généralisation d'ensemble est extrêmement délicate, à priori, car le phosphore total, tel qu'il est mesuré, inclut les formes de phosphore difficilement accessibles aux plantes ; or, d'un type de sol à l'autre, les proportions de P-insoluble par rapport au P-total peuvent varier très sensiblement.

2.3. L'utilisation du rapport N/P_2O_5

On constate, dans la plupart des sols tropicaux, deux déficiences principales : Azote et Phosphore. Un accroissement des fournitures en azote doit donc s'accompagner d'une augmentation des teneurs du sol en phosphore. Inversement, si les taux d'azote du sol sont très bas, les prélèvements de phosphore par les plantes seront réduits d'autant.

2.3.1. D'où l'utilisation du rapport N/P_2O_5

L'importance de ce rapport a été mise en évidence la première fois en Afrique Tropicale par DABIN (1954) pour les cultures irriguées du delta central nigérien. Sous cette forme ou sous forme d'interaction entre N et P, il a été étudié depuis par un certain nombre d'auteurs :

DABIN (1956 et 1961), DABIN et LENEUF (1960), BOUYER et DABIN (1963), BORGET et al (1963), BOUYER (1967), COPE et HUNTER (1967), NGO-CHANG-BANG (1967),

et il s'est révélé valable pour toutes les cultures et pour tous les sols dans une large gamme de sols et de climats qui va des sols ferrallitiques très désaturés de basse Côte d'Ivoire sous 2000mm de pluie aux sols subdésertiques qui ne reçoivent que 200 à 300mm de pluie.

Ce rapport doit être compris entre 2 et 4 :

$$4 \geq \frac{N \text{ total } \text{‰}}{P_2O_5 \text{ total } \text{‰}} \geq 2$$

Lorsque le pH est inférieur à 5,5, ce rapport n'est plus valable (dominance des formes inassimilables du phosphore, phosphore lié au fer en particulier). Lorsqu'il est compris entre les 2 limites indiquées ci-dessus, un tel rapport implique un bon équilibre entre les alimentations azotées et phosphoriques, mais il ne préjuge en rien du niveau de cette alimentation.

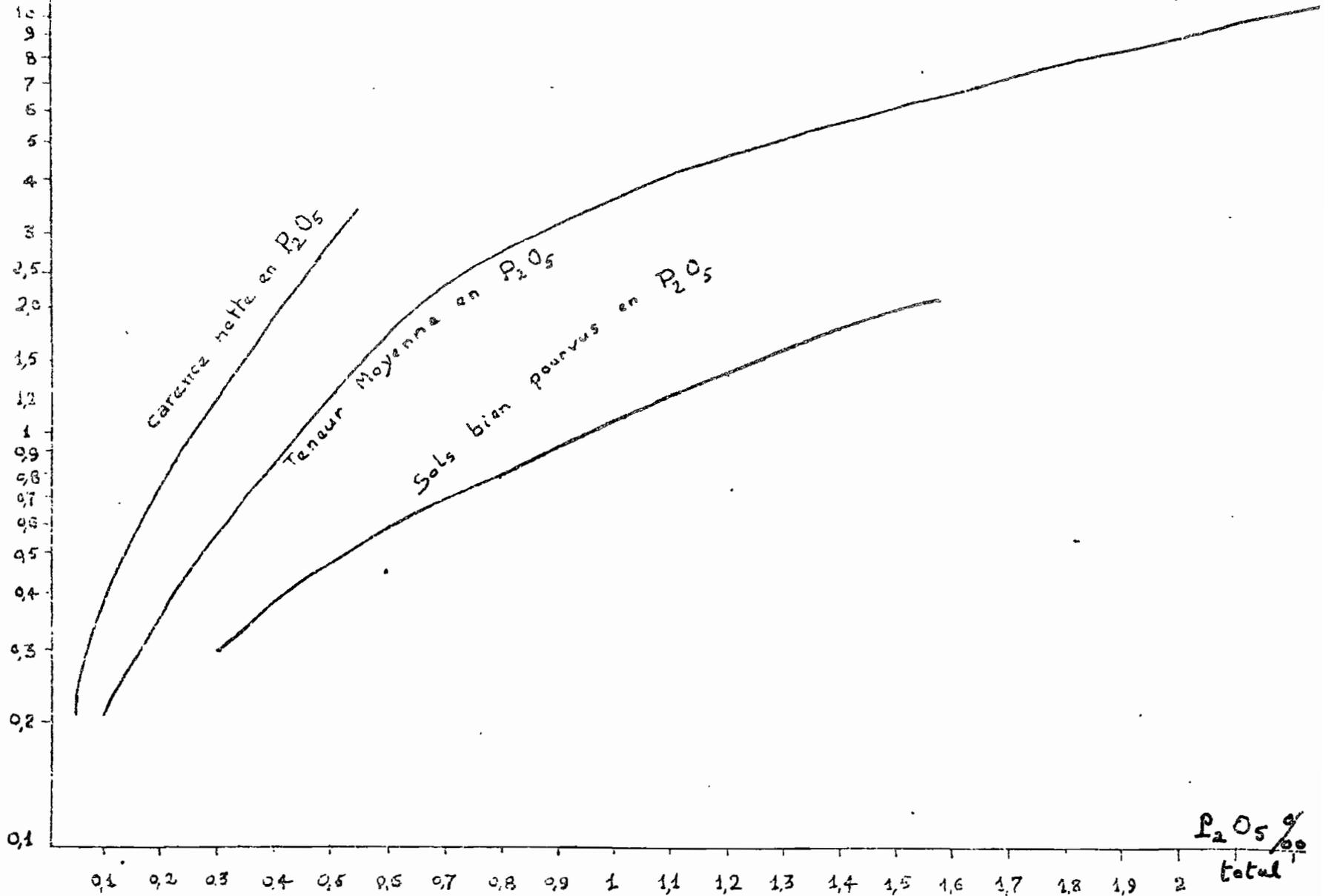
2.3.2. Le rapport N/P_2O_5 peut néanmoins servir à déterminer les besoins en engrais

Si $N/P_2O_5 > 4$, le sol est fortement carencé en phosphore ; il est donc inutile de lui fournir des engrais azotés si le taux de phosphore n'a pas été préalablement relevé,

Si $N/P_2O_5 < 2$, le sol est bien pourvu en phosphore et les engrais phosphatés sont inutiles ; par contre les engrais azotés marqueront fortement,

Rapport Azote total / Phosphore total dans les sols tropicaux (B. DABIN 1961)

10%



$$\text{Si } 4 \leq \frac{N}{P_{205}} < 2$$

tout apport d'engrais phosphaté doit être accompagné d'une fourniture équivalente d'azote, et réciproquement, sinon on risque un déséquilibre dans l'alimentation minérale.

2.3.3. Tel qu'il a été établi, ce rapport N/P_{205} ne fait intervenir que le phosphore total, d'où un certain nombre de restrictions et d'adaptations apportées à son emploi (DABIN 1961 - MOULINIER 1962)

• pH : pour des pH inférieurs à 5,5, les valeurs du rapport N/P_{205} 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.

• taux d'azote total :

-dans les sols pauvres en azote (0,20 à 0,30‰), le besoin en engrais phosphatés se situe déjà à des valeurs de $\frac{N}{P_{205}}$ voisins de 2.

-pour des sols possédant environ 1‰ de N total, une déficience en phosphore se manifeste pour un rapport $\frac{N}{P_{205}}$ un peu supérieur à 2.

-pour des sols très riches en matières organiques avec 4‰ et plus d'azote total, le rapport $\frac{N}{P_{205}}$ peut atteindre 4 sans que se manifeste un besoin de phosphore.

Toutefois, pour les plantes exigeantes en phosphore comme le cacaoyer, le rapport $\frac{N}{P_{205}}$ doit rester proche de 2 même si le sol est bien pourvu en matières organiques (MOULINIER 1962).

2.4. Les teneurs en P_{205} assimilable

Avec l'apparition récente de méthodes permettant un dosage du phosphore accessible aux plantes (P-soluble, P-Al, P-Ca, P-organique dans une certaine mesure), un certain nombre d'auteurs (CHAMINADE 1965 pour le nord du Dahomey, DABIN 1964-a et aux Antilles et DABIN 1967 pour des sols ferrugineux tropicaux/ferrallitiques, des sols peu évolués sur alluvions et des vertisols d'Afrique, VIZIER 1965 au Tchad, LATHAM 1965 dans les savanes de Côte d'Ivoire, ROCHE 1967 à Madagascar) ont repris cette question du phosphore en l'éclairant d'un jour nouveau.

On peut en dégager la conclusion suivante :

Les besoins en engrais phosphatés apparaissent lorsque les teneurs en phosphore assimilable sont inférieures :

< 140 p.p.m de P_2O_5 { LATHAI 1965 en culture cotonnière en
ou 60 p.p.m de P { Côte d'Ivoire

< 160 p.p.m de P_2O_5 { DABIN 1964-a aux Antilles
ou 70 p.p.m de P { ROCHE 1967 à Madagascar

On peut également utiliser le rapport $\frac{P_2O_5 \text{ Ass } \%}{N \text{ total } \%} = Z$

si $r > \frac{1}{10}$, le sol a plus besoin d'engrais azotés que d'un apport de P

si $\frac{1}{20} > r > \frac{1}{10}$, le sol a autant besoin de N que de P

si $r < \frac{1}{20}$, la carence en P est supérieure à la carence N

mais de tels résultats ont encore besoin de confirmations.

3 - INTERACTION DU PHOSPHORE AVEC DES ELEMENTS MINERAUX AUTRES QUE L'AZOTE =====

DANS L'ALIMENTATION MINERALE DES CULTURES

=====

Ce problème a été relativement peu étudié en Afrique francophone et, dans les expérimentations citées ci-après, il est difficile de faire la part entre une interaction simple entre le phosphore et un élément donné et la déficience en cet élément qui entraîne un arrêt de croissance de la plante ou son dépérissement (loi du minimum).

Interaction P,S : Sur riz pluvial en République Centrafricaine, COLONNA (1967) trouve une interaction positive Phosphore-Soufre (sols ferrallitiques faiblement désaturés, 1400mm de pluie).

Sur arachide au Sénégal, en Haute-Volta (sols ferrugineux tropicaux) et en République Centrafricaine, l'addition de Soufre minéral à un phosphate tricalcique semble rendre ce dernier plus assimilable pour la plante (PREVOT et OLLAGNIER 1964) ; il semble probable qu'il s'agit, dans certains cas, d'une carence simultanée en ces deux éléments comme on l'a trouvée sur beaucoup de

sols du Sénégal, de Haute Volta et du Mali (CHAMINADE 1965). Pourtant HONES (1964) pense qu'il peut y avoir de véritables interactions P-S sur arachide et cotonnier.

Interaction P.Mg : Sur bananier, MARTIN-PREVEL (1967), constate qu'une déficience en magnésium entraîne une absorption exagérée du phosphore.

Interaction P K : Sur cocoteraie en Côte d'Ivoire (sol peu évolué sur sable côtier quaternaire), une fumure potassique favorise une meilleure alimentation des cocotiers en phosphore même sans apport de phosphates (BRUNIN 1968). Il pourrait s'agir simplement ici d'une carence en potasse.

Sur les sols ferrugineux tropicaux sableux du Sénégal, POULAIN (1967-b) constate qu'il existe quelques interactions, notamment P.K, sur arachide, avec des fumures faibles, mais que ces interactions n'ont pas lieu avec de fortes fumures.

Interaction P. Mg. K : Sur cacaoyer (Côte d'Ivoire), un apport d'engrais phosphatés, -phosphate bicalcique-, provoque évidemment une absorption plus forte du phosphore et de calcium mais également de magnésium ; en même temps, on constate un effet dépressif sur l'alimentation en azote et en potasse, ces résultats étant établis par diagnostic foliaire (VERLIERE 1967).

L'imprécision de ces données quand il ne s'agit pas de contradictions (au moins apparentes), leur caractère fragmentaire indiquent qu'il faudra de nombreuses études pour se faire une opinion précise. Toutefois, une interaction est extrêmement intéressante :

- c'est celle qui concerne la meilleure utilisation des phosphates tricalciques par la
- culture (ici l'arachide) à la suite d'un enfouissement d'engrais vert (POULAIN 1967-b):
- Est-ce simplement parce que la meilleure porosité du sol obtenue par le labour et con-
- servée par l'engrais vert enfoui permet un plus intense développement des racines et
- donc facilite l'approche des particules de phosphate par ces racines ?, ou bien s'agit-
- il d'un processus plus complexe ? la question reste posée.

4 - LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS TROPICAUX

4.1. La 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 percolation. Il en est de même si l'on ajoute des engrais, et ceci, aussi bien, dans les sols ferrugineux tropicaux que dans les sols ferrallitiques (TCURTE et al 1964, ROOSE et GODEFRDY 1968, CHARREAU et FAUCK 1969, BLONDEL et POULAIN (1970).

Ces pertes ne sont tout de même pas nulles, même sans apport d'engrais : VIDAL et FAUCHE (1962), TCURTE et al (1964), en bacs lysimétriques, les estiment de 30 grammes à 90 grammes par hectare et par an, sous divers types de jachère, pour des sols ferrugineux tropicaux sableux (Dior) du Sénégal.

ROOSE et JADIN (1969), en Côte d'Ivoire, sur des sols ferrallitiques moyennement désaturés formés sur granite calco-alcalin, ont trouvé sous forêt, une perte totale de 0,7 à 1,2 Kg de P_2O_5 par hectare et par an, pertes dues à l'érosion et au drainage (tant vertical qu'oblique). Il s'agit tout de même de chiffres très faibles, ce qui conduit la plupart des observateurs à conclure que l'érosion est la principale responsable des pertes en phosphore (DABIN et LENEUF 1958, ROOSE 1965, 1967, 1970). Mais, à partir du moment où l'érosion est jugulée, on conçoit l'intérêt des agronomes pour la fumure de fond au moyen des phosphates, le phosphore étant l'élément qui est le moins lixivié dans les sols tropicaux quels qu'ils soient.

4.2. L'insolubilisation du phosphore dans les sols.

En République Centrafricaine, FORESTIER (1960) constatait, sur sol ferrallitique moyennement désaturé planté en caféier que, dix huit mois après épandage de phosphate bicalcique, le phosphore acido-soluble (mesuré par la méthode Truog), avait diminué des deux tiers. Il attribuait ce phénomène aux alternances de dessiccation et d'humectation qui se produisent à la surface du sol pendant la saison des pluies.

Il apparaît, actuellement, qu'il s'agit d'un processus plus général (peut-être favorisé par les alternances dessiccation-humectation ?) qui est, en fait, la transformation des phosphates de Ca et Al en phosphate de fer.

A court terme, dans les sols riches en fer libre hydraté (goethite), plus de 50% du phosphore ajouté sous forme d'engrais, peut être immédiatement rétrogradé sous forme de Phosphore lié au fer. Mais, dans la majorité des cas, c'est plutôt l'adsorption par l'aluminium qui domine (DABIN 1970-a). Il existe aussi une évolution à long terme, très lente (plusieurs années) encore mal connue en Afrique francophone.

5 - LES ENGRAIS PHOSPHATÉS

=====

Malgré les besoins généralisés des sols africains en engrais phosphatés, ceux-ci sont encore peu utilisés par les agriculteurs, à l'exception d'un certain nombre de cultures de rapport (caféier, cacaoyer, arachide, cotonnier, riz irrigué...). Néanmoins, ces engrais ont fait l'objet d'une large expérimentation dans les stations de recherche.

5.1. Formes du phosphore dans les engrais.

L'efficacité sur les cultures des différentes formes d'engrais contenant du phosphore a été testée en de nombreux points d'Afrique francophone ; malgré tout, les résultats obtenus sont encore disparates et difficiles à relier dans un schéma d'ensemble.

5.1.1. Les engrais phosphatés utilisés peuvent être rangés en trois grandes catégories :

- Les formes insolubles à l'eau et au citrate

	P_2O_5 total
Phosphate tricalcique naturel du Maroc	25%
Phosphate tricalcique naturel de Taïba (Sénégal)	37%
Phosphate tricalcique naturel du Togo	-
Schlamms phosphatés (tricalcique)	23%

- Les formes contenant un certain pourcentage de P_2O_5 soluble à l'eau et/ou au citrate d'ammoniaque :

	P_2O_5 total	Solubilité à l'eau	Solubilité au citrate
Phosphate d'alumine calciné du Sénégal ou phosphal	35%	0	26,4%
Scories de déphosphoration	18%	{ très peu soluble	
Phosphate bicalcique	38%		soluble
Phosphate monocalcique super simple	18 à 25%	soluble	soluble
super triple	46%	soluble	soluble

- Les formes où le phosphore est lié à un autre élément fertilisant :

	P_2O_5 total
Phosphate d'Ammonium	50%
Métaphosphate de potassium	59%

5.1.2. L'efficacité des diverses formes d'engrais phosphatés

5.1.2.1. En rizières inondées, les phosphates tricalciques, bicalciques et les scories de déphosphoration sont équivalentes à Madagascar (ROCHE, VELLY et NGO-CHAN-BANG 1967). Par contre, au Mali, on semblait, en 1950, préférer le phosphate bicalcique (Service agronomique de l'Office du Niger 1950).

Dans la vallée du Sénégal sur des sols à caractère vertique, pourtant acides (pH 5 à 6,5), seul le superphosphate triple donne, en deuxième année, un supplément de rendement (COUEY et al. 1967).

Il est vrai que dans les rizières de zone tropicale sèche, les engrais phosphatés ne marquent pas sauf, peut-être, si l'on en apporte des quantités considérables (450 Kg de P_2O_5 à l'hectare, selon PIERI (1967) au Mali, 950 Kg/Ha au Sénégal, selon COUEY et al.).

5.1.2.2. Dans la zone tropicale humide (sols ferrallitiques), les pH inférieurs à 6, qui sont fréquents, devraient permettre une bonne solubilisation des phosphates tricalciques.

De fait, les planteurs de bananiers de basse Côte d'Ivoire utilisent de fortes doses de phosphate tricalcique dans leurs plantations (sols ferrallitiques et sols hydromorphes, tourbeux).

Toutefois, en zone forestière, MOULINIER (1962), semble préférer le phosphate bicalcique, pour les cacaoyers et caféiers de Côte d'Ivoire, tout en reconnaissant un effet favorable du calcium apporté.

En zone forestière également, mais en République Centrafricaine, le phosphate bicalcique ou monocalcique est utilisé à la fois sur caféier (FORESTIER 1966) et sur riz pluvial (COLONNA 1967), sans qu'il y ait eu apparemment de comparaisons systématiques.

Dans les savanes de la République Centrafricaine, à Bambari, les formes bicalcique et monocalcique sont équivalentes en culture cotonnière et manifestent une supériorité nette sur le phosphate tricalcique ; par contre, l'effet résiduel, important pour ces trois formes de phosphates, est identique sur les cultures vivrières des années suivantes (BRAUD 1962 et 1967).

Dans la même région, une comparaison entre phosphate monocalcique, phosphate d'ammonium, phosphate d'alumine, révèle une supériorité de 2 premières formes,

les plus solubles, sur la troisième (I.R.C.T. 1969).

Dans le nord de la Côte d'Ivoire, on tend actuellement à utiliser le phosphate d'ammonique probablement pour des questions de concentration d'élément fertilisant.

Au Ghana, dans les savanes du Nord, le phosphate bicalcique a donné des résultats supérieurs au phosphate tricalcique du Togo pour une culture d'arachide (OFCRI 1965), ce qui confirme les travaux faits en Côte d'Ivoire et en République Centrafricaine.

5.1.2.3. En zone tropicale semi-humide, sur des sols ferrugineux tropicaux et sols ferrallitiques faiblement désaturés dont les pH sont souvent voisins de 6, la plupart des auteurs s'accordent pour reconnaître une supériorité immédiate des formes les plus solubles :

- En Haute Volta : il y a supériorité du monocalcique du bicalcique et du métaphosphate de potassium sur le tricalcique pour des cultures de sorgho et d'arachide (BOUYER 1965, DUPONT de DIENECHIN 1967, BOCKELEEE-MORVAN 1968).
- Au Niger : les formes les plus solubles (monocalcique et bicalcique) donnent les meilleurs résultats (LIENART et NABOS 1967).
- Au Mali : une comparaison entre phosphates monocalcique, bicalcique et tricalcique donne, en première année sur coton, une équivalence entre mono et bicalcique qui sont tous les deux supérieurs au tricalcique; mais, en seconde année, sur sorgho, l'effet résiduel du phosphate monocalcique domine largement.
- Au Sénégal : ce problème a été étudié de très près par un certain nombre d'auteurs (GILLIER et PREVOT 1960, BOCKELEEE-MORVAN 1961 et 1966, BOUYER 1965, TINTIGNAC 1966, GAUTREAU 1966, TCURTE et al. 1967, BLONDEL et POULAIN 1970, POULAIN 1970-b).

De leurs travaux, on peut dégager les conclusions suivantes :

5.1.2.3.1. Les phosphates monocalcique et bicalcique sont ceux qui donnent les résultats les plus constants du nord au sud du Sénégal : ils sont seuls utilisables dans le nord du pays (400mm de pluie).

5.1.2.3.2. Le phosphate d'alumine est utilisé annuellement à faible dose, environ de 40 à 80 Kg/Ha, donne de bons résultats au sud du pays (pluviosité 900 à 1200mm en moyenne) ; dans le centre (600-800mm) son efficacité, bonne en année très humide, diminue grandement si l'année connaît un déficit de pluie. En fait, même dans le sud, une pluviosité insuffisante provoque une irrégularité des réponses de la plante au phosphate d'alumine.

A fortes doses, en fumure de fond (600 à 700 Kg/Ha), le phosphate d'alumine est supérieur dans le sud, pendant 3 ans au moins, à une fumure annuelle de 60 à 80 Kg de phosphate bicalcique. Dans le centre, l'effet est sensiblement le même que pour la fumure bicalcique annuelle. Dans le nord du pays, la fumure de fond ne donne aucun résultat.

5.1.2.3.3. Le phosphate tricalcique.

A faible dose (environ 40 à 80 Kg/Ha), le phosphate tricalcique est toujours inférieur aux autres formes, mais principalement dans le centre et le nord du pays (moins de 800mm de pluie), où il ne donne aucun accroissement de récolte. Au sud de la Gambie (1100 à 1200mm de pluie annuelle), l'efficacité du tricalcique tend à se rapprocher de celle du bicalcique.

A fortes doses, en fumure de fond (400 Kg à 2000 Kg -moyenne 700-1000 Kg- mise tous les 4 à 5 ans), les résultats se répartissent géographiquement ainsi :

- Zone nord (400 à 600mm de pluie), résultat nul.
- Zone centre (600 à 800mm de pluie), le phosphate tricalcique est inférieur au phosphate d'alumine employé dans les mêmes conditions, mais son arrière-action s'affirme pour les seconde et troisième cultures.
- Zone sud (800 à 1200mm de pluie), le tricalcique est au moins aussi efficace que le phosphate d'alumine en fumure de fond, et présente une supériorité sur la fumure annuelle au phosphate bicalcique (80 Kg/Ha/an).

5.1.2.4. Dans cette question des formes d'engrais phosphatés, il semble bien qu'il faille faire la différence entre :

la fumure de fond destinée à relever le taux de P_2O_5 du sol, qui peut être réalisée avec des formes peu solubles, et la fumure annuelle qui couvre les besoins immédiats des plantes.

La fumure de fond ne devrait pas exclure un apport annuel de phosphate soluble en couverture (POULAIN 1970-b).

Pour des raisons étrangères à la fourniture de phosphore (apport de calcium pour éviter une baisse de pH), il apparaît, actuellement, que le phosphate tricalcique s'impose comme fumure de fond au détriment du phosphate d'alumine (TOURTE et al. 1967). En outre, en région humide, un phosphate à dissolution lente, comme le tricalcique, oppose une certaine inertie aux phénomènes de rétrogradation.

5.1.3. En conclusion, on peut dégager le schéma suivant, qui semble valable pour tous les types de sols d'Afrique francophone :

- Lorsqu'il s'agit de relever le taux de phosphore d'un sol, le phosphate tricalcique paraît être l'instrument de choix apportant à la fois phosphore et calcium au sol ; le phosphate d'alumine a la même efficacité exprimée en termes de P_2O_5 mais il n'apporte pas de calcium.

Etant donné le faible entraînement du phosphore par les eaux de drainage, on peut sans risque, utiliser de fortes doses de P_2O_5 .

- Lorsque l'on veut simplement assurer, annuellement, les besoins des plantes, les formes solubles du phosphore, phosphate monocalcique, bicalcique, phosphate d'ammoniac, métaphosphate de potassium, sont à peu près équivalentes et, en tout cas, supérieures au phosphate tricalcique. Le phosphate d'alumine peut, à la rigueur, être employé, bien que ses résultats soient inférieurs à ceux des formes plus solubles.

La fumure de fond n'exclut nullement une fumure annuelle.

5.2. Effet résiduel des engrais phosphatés.

Etant donné que le phosphore n'est, pratiquement, pas entraîné par lessivage, on pourrait s'attendre à ce que les fumures phosphatées aient des actions importantes de longue durée sur les cultures qui suivent.

En fait, il faut compter avec la rétrogradation du phosphore des engrais dans les sols riches en fer (sols ferrallitiques principalement). Bien que le mécanisme de cette rétrogradation soit mal connu en fonction des types de sols, RICHARD (1967) constate que l'arrière-action des fumures minérales mises sur cotonnier ne dépasse guère les 2 cultures suivantes au Tchad, en République Centrafricaine, en

Côte d'Ivoire, au Dahomey et au Togo (il s'agit de fumures annuelles faites avec de petites doses, 20 à 80 Kg/Ha de P_2O_5 , sous forme de phosphates bicalcique ou monocalciques.

Mais sur les cultures de seconde année, on observe tout de même de bons résultats :

5.2.1. Sols ferrallitiques.

A la station de Bambari, les cultures de deuxième année profitent largement de la fumure N P mise uniquement sur le coton de première année, l'effet résiduel étant uniquement du au phosphore (BRAUD 1967):

	1ère année	2ème année	
	coton	arachide	+ sésame
	Kg/Ha	Kg/Ha	Kg/Ha
témoin sans fumure	952	1.013	283
Engrais			
44 Kg N			
55 Kg P_2O_5	1.367	1.453	410
25 Kg S			

5.2.2. Sols ferrugineux tropicaux.

- Au Dahomey, une fumure 39 Kg de N, 126 Kg de P_2O_5 , 43 Kg de S mise sur coton, entraîne l'année suivante, une augmentation de 50% des rendements en sorgho (15 qx au lieu de 10 au témoin), l'effet résiduel étant uniquement imputable au phosphore (BRAUD 1967).
- Au Niger, une fumure minérale extrêmement modeste mise sur arachide (9 Kg/Ha de N, 30 Kg/Ha de P_2O_5 , 15 Kg/Ha de K_2O), fait tout de même passer les rendements du mil de seconde année de 1132 Kg/Ha à 1329 Kg/Ha (IABCS 1966).
- Au Sénégal, les améliorations sur sorgho de deuxième année sont du même ordre, sinon plus fortes, après une fumure sur arachide de première année à faible dose (formes solubles de P):

Si l'on met un phosphate tricalcique (165 Kg/Ha de P_2O_5) en enfouissant l'engrais vert, l'effet résiduel du au phosphore seul est, en troisième année de 226 Kg/Ha de mil. Ce chiffre doit être comparé avec le témoin, 1000 Kg/Ha, et avec celui qui est provoqué par l'interaction phosphore x azote de l'engrais azoté apporté sur mil, interaction qui donne un supplément de rendement de 596 Kg/Ha (d'après CHARREAU et POULAIN 1964).

5.2.3. Sols hydromorphes.

Quelques essais effectués dans la vallée du Sénégal ont montré la complexité du problème : la rétrogradation du phosphore semble totale dès la première année quelle que soit la dose apportée et la solubilité du phosphate (COUEY et al. 1967, MAYMARD 1970).

5.2.4. En résumé, on peut affirmer que l'effet résiduel des fumures phosphatées est encore net la seconde année de culture, mais qu'il s'atténue ensuite assez vite, lorsque l'on a donné au sol de petites doses de phosphates (20 à 80 Kg/Ha de P_2O_5).

Cette arrière-action est de plus longue durée avec des formes insolubles, comme le phosphate tricalcique, dont la rétrogradation est fonction de la vitesse de solubilisation : même avec des doses de 400 à 1000 Kg de phosphate en Casamance (sud du Sénégal) ou de plusieurs tonnes en Côte d'Ivoire (bananiers), il semble imprudent d'escompter un effet résiduel au-delà de 4 à 6 ans.

CONCLUSION

=====

Nos connaissances sur le phosphore des sols d'Afrique tropicale francophone ont largement progressé depuis deux décennies et surtout depuis les dix dernières années.

On sait maintenant comment évaluer les besoins en phosphore des sols et adapter les doses d'engrais à ces besoins.

On commence à connaître les formes de phosphore qui sont les plus fréquentes dans les sols et à pouvoir estimer leur degré d'utilisation dans les plantes : de ce fait, on devrait pouvoir arriver à établir, prochainement, une échelle de fertilité,

basée sur le phosphore assimilable, valable pour les sols d'Afrique et plus simple que les échelles de fertilité actuellement utilisés.

Mais un large domaine reste pratiquement inconnu, la rétrogradation du phosphore : on sait qu'elle est énergique dans les sols riches en fer, mais on connaît très mal les processus d'insolubilisation du phosphore dans les sols, leur degré d'intensité et le temps nécessaire à cette insolubilisation.

On ne sait pas du tout si on peut l'éviter ou même la retarder car si, expérimentalement, il est possible de rendre soluble le phosphore lié au fer, aucune technique efficace et économiquement valable, ne peut être actuellement envisagée dans la pratique agricole. Et pourtant, ce problème de l'insolubilisation du phosphore sous des formes inaccessibles aux plantes conditionne l'emploi des engrais phosphatés.

Tant que l'on ne pourra pas éviter la rétrogradation du phosphore, les apports de cet élément au sol sont destinés à s'insolubiliser à courte échéance, tout au moins pour la partie qui n'a pas été utilisée immédiatement par les cultures.

Et pourtant, le phosphore est l'un des corps qui manque le plus dans les sols tropicaux.

C'est dire toute l'importance de ce problème.

C H A P I T R E VIII

=====

LE SOUFRE ET LES CARENCES EN SOUFRE

=====

1 - LE SOUFRE DANS LES SOLS TROPICAUX

=====

Parce que dans toute l'Afrique francophone on a longtemps utilisé le sulfate d'ammoniaque comme unique engrais azoté, on n'a que tardivement reconnu l'importance de l'apport de soufre pour les plantes cultivées.

1.1. Historique de la découverte des carences en soufre en Afrique tropicale francophone.

En 1955, pour une cause fortuite (mauvais approvisionnement du marché) on a épandu de l'urée, au lieu de sulfate d'ammoniaque, sur les champs de coton de la station I.R.C.T. de Bambari en République Centrafricaine. Or, les cotonniers restèrent rachitiques et ne manifestèrent aucunement les excellentes réponses au sulfate d'ammoniac constatées les années précédentes et alors attribuées à l'azote. Les agronomes de l'I.R.C.T. eurent l'idée de comparer les symptômes observés à ceux que la littérature anglo-saxonne avait décrits à propos de la carence en soufre du cotonnier en Afrique Orientale.

L'année suivante, 1956, on a pu calmer une prétendue faim d'azote avec des apports de sulfate de soude, sulfate de magnésie etc..., alors qu'urée, nitrate de soude et nitrate d'ammoniac restaient sans effet (BRAUD 1962 et 1964).

La preuve était donc faite, à la fois, de l'importance du soufre dans l'alimentation minérale du cotonnier et d'une déficience du sol en cet élément.

Depuis cette date on a constaté que l'alimentation en soufre des plantes, conditionne pour une part importante les rendements, non seulement du cotonnier, mais beaucoup d'autres plantes cultivées et que son insuffisance provoque, à défaut de carence caractérisée, de forts déficits dans les récoltes :

- Bananier au stade jeune en Côte d'Ivoire (étude en milieu artificiel)
(CHARPENTIER et MARTIN-PREVEL 1965)
- Arachides (PREVOT et OLLAGNIER 1964, BOKELEE-MORVAN 1966,
1968 a et b)
- Mil et sorgho, (POULAIN 1970-c)
- caféier, etc... (FORESTIER 1964, COLONNA 1964, VERLIERE 1967-a)

Cette importance d'un apport éventuel de soufre est confirmée par GREENWOOD (1951 et 1954) et WATSON (1964) pour l'arachide, le soja, le cotonnier, le mil et le sorgho en Nigéria du Nord.

Dans tous les exemples cités ci-dessus, il s'agit de sols de savane et pratiquement jamais de sols forestiers. Pour les premiers, on peut considérer que la déficience est très générale et qu'elle prend, parfois, la forme d'une véritable carence (cotonnier en République Centrafricaine).

1.2. Les teneurs en soufre des sols tropicaux.

Faute d'une méthode analytique appropriée, on ne trouve jusqu'à ce jour, dans la littérature, que peu de chiffres indiquant quelles peuvent être les teneurs en soufre des sols, les seuils de carence ou les taux qui peuvent provoquer une toxicité.

1.2.1. Toutefois, les premiers résultats d'une méthode mise au point tout récemment dans les laboratoires de l'O.R.S.T.O.M. (DABIN 1970-b), et pas encore passée dans l'usage courant, permettent tout de même de penser que, dans la majorité des sols d'Afrique occidentale, le soufre représente environ le ^{dixième} centième de la teneur en azote (donc approximativement le ^{centième} millième du carbone organique dans le cas courant où $\frac{C}{N} \neq 10$).

On ne sait pas encore si ce pourcentage est suffisant pour éviter les carences ou si d'autres facteurs interviennent comme la vitesse de décomposition ou la nature de la matière organique.

1.2.2. Quant à la toxicité du soufre, on ne l'a jamais constatée dans les sols même après apports répétés d'engrais en contenant.

Pourtant, on s'est aperçu avec des cultures sur solution nutritive que l'intervalle était très faible entre carence et toxicité : (RAPPORT de SYNTHÈSE du GROUPE II-1, Tananarive 1967) ; l'action du soufre s'apparente en cela à celle des oligo-éléments.

Peut-on considérer comme une toxicité due au soufre les accidents qui se produisent dans les sols de mangrove après drainage?

On sait qu'au Sénégal (région de la basse Casamance), la mise en valeur sous forme de rizières de ces sols riches en sulfures a provoqué des baisses considérables de pH, constatées par VIEILLEFON⁽¹⁹⁶⁸⁾, dues à l'oxydation des sulfures ; mais les inconvénients signalés semblent plus provoqués par la présence d'ions Al^{+++} ou Fe^{+++} qu'à celle d'ions sulfates.

Des travaux sont actuellement en cours, mais déjà on a constaté une action remarquable des apports d'amendements calcaires sur la végétation du riz.

1.3. Le soufre et les types de sol.

Il est encore trop tôt pour pouvoir relier avec exactitude les teneurs en soufre des sols par rapport aux unités pédologiques ; quelques lignes directrices se dégagent cependant de la littérature.

1.3.1. Sols ferrallitiques.

On a remarqué qu'une plante très sensible à l'action du soufre, comme le cotonnier, ne présentait jamais de carence, ou même de déficience légère, en cet élément si elle était cultivée sur une défriche forestière.

Par contre, sur une savane voisine (distante parfois de quelques centaines de mètres) les symptômes de carence se manifestaient avec vigueur (BOUCHY 1970).

En outre, on a constaté que les carences en soufre, d'abord très vives, s'atténuaient progressivement si on cultivait le même sol plusieurs années de suite même sans apport d'engrais en contenant (BRAUD 1967-a, RAPPORT de SYNTHÈSE du GROUPE II-1, Tananarive 1967, BOUCHY 1970). Aucune explication satisfaisante n'a encore été donnée de ces faits.

1.3.2. Sols ferrugineux tropicaux.

En Haute-Volta et au Niger, les services agronomiques, préconisent un apport de superphosphate (contenant un peu de soufre) sur arachide (BOUYER 1968), mais

uniquement du phosphate d'ammoniac sur mil et sorgho (DUPONT de DINECHIN 1967).

Au Mali, la déficience du sol en soufre ne vient, pour le cotonnier, qu'au troisième rang après le phosphore et l'azote (I.R.C.T. 1967).

Au Sénégal, l'arachide est très sensible aux engrais contenant du soufre.

Au Dahomey (région centrale), comme à Tikem au Tchad, on n'a jamais constaté de déficience du sol en soufre (il en est de même au sud-est de Madagascar).

1.3.3. Autres types de sol.

Nous n'avons aucun renseignement sur leur teneur habituelle en soufre.

2 - BESOINS EN SOUFRE DES PLANTES CULTIVEES

=====

Quelques chercheurs ont essayé de déterminer expérimentalement, en s'aidant du besoin du diagnostic foliaire, quels étaient les besoins des plantes en soufre.

2.1. Sols ferrallitiques.

En République Centrafricaine, BRAUD (1964), considère que là où se manifeste une carence en soufre, il faut apporter au cotonnier à peu près autant de soufre que d'azote, donc posséder une formule d'engrais avec un rapport $\frac{N}{S} = 1$. Toutefois, dans la même région, on employait en 1968, un engrais avec un rapport N/S voisin de 2 (I.R.C.T. 1969); aucun inconvénient important n'a été noté.

2.2. Sols ferrugineux tropicaux.

Au Mali, BRAUD (1966) conseille un rapport N/S = 1 dans les engrais apportés au cotonnier sur des sols pourtant moins carencés en soufre que les précédents; il convient cependant de ce que, dans la pratique, un rapport N/S = 2 peut suffire, ce qui correspond ici à, un apport de soufre, de 20 Kg par hectare environ.

Au Sénégal, BOCKELEE-MORVAN (1966) a calculé que les besoins en soufre d'une culture d'arachide étaient d'environ 6 Kg par hectare et par an. Des chiffres plus élevés ont cependant été cités par divers auteurs.

2.3. Autres types de sol.

Nous n'avons aucun renseignement sur ce sujet.

3 - FORME DU SOUFRE ASSIMILABLE PAR LES PLANTES

3.1. A la suite d'HOMES (1964), on considère en Afrique tropicale francophone que seul l'anion SO_4^{--} est assimilable par les plantes.

Quoiqu'il en soit, la forme d'apport du soufre importe peu, semble-t-il : sulfate d'ammoniaque, sulfate de soude ou soufre minéral (BOCKELEEE-NORVAN 1966, PREVOT et OLLAGNIER 1964), le soufre minéral étant immédiatement transformé en sulfate dans le sol.

Pourtant PY (1964) relate une action dépressive du soufre employé seul sur ananas alors que le sulfate d'ammoniac et le sulfate de potasse augmentent les rendements.

Aucune étude n'est venue confirmer, sur les sols d'Afrique francophone, les observations d'HOMES (1964), qui constate que les plantes peuvent absorber certains acides aminés riches en soufre à partir d'une solution nutritive.

3.2. Il est possible que l'atténuation des carences en soufre à la suite de plusieurs années de cultures (signalée au paragraphe 1.3.1.) soit due à un changement dans la nature des composés soufrés au sein de la matière organique du sol.

Dans l'état actuel de nos connaissances, ce ne peut être qu'une hypothèse de travail parmi d'autres (meilleure activité des bactéries du cycle du soufre dans les sols cultivés, accélération de la minéralisation de la matière organique à la suite des cultures etc...).

4 - LA DYNAMIQUE DU SOUFRE

4.1. Aucun travail n'est venu confirmer pour les sols d'Afrique francophone le cycle du soufre décrit par ARNAUDI et CRAVERI (1964) et HOMES (1964) à savoir :

- Oxydation du soufre minéral en SO_4^{--} par des bactéries (avec des sulfures comme forme intermédiaire).
- Assimilation de cet anion sous forme organique dans les cellules de bactéries, capables également d'absorber sulfates et sulfites.
- Minéralisation, par oxydation, de ces composés organiques.
- Absorption des ions SO_4^{--} par la plante.

- 4.2. Les apports de soufre par les pluies seraient en Afrique d'environ 1 Kg par hectare et par an, selon ROTINI (1964), au lieu de 80 à 100 Kg en Europe à proximité des grands centres industriels.
- 4.3. La lixiviation du soufre par les eaux de drainage a fait l'objet d'études précises de TOURTE, VIDAL, JACQUINOT, FAUCHE et NICOU (1964), sur les sols ferrugineux tropicaux sableux (sol Dior) du Sénégal.

A l'aide de bacs lysimétriques, ces auteurs ont mesuré les entraînements suivants :

Jachère nue	10 Kg/Ha/an de S
Jachère naturelle brûlée	8 Kg/Ha/an de S
Jachère naturelle enfouie	11 Kg/Ha/an de S
mil engrais vert	9,6 Kg/Ha/an de S
culture d'arachide	8 à 11 Kg/Ha/an de S
culture de mil	32 et 54 Kg/Ha/an de S

(Pour cette dernière culture seulement, il y a eu apport de 93 Kg et de 160 Kg/Ha/an de soufre sous forme de sulfate d'ammoniac, d'où ces pertes élevées, respectivement, 32 et 54 Kg/Ha/an).

D'après les chiffres qu'ils indiquent, il semble qu'un apport d'engrais phosphaté (phosphate tricalcique) puisse favoriser légèrement l'entraînement du soufre dans certaines conditions (Jachère nue).

Quoiqu'il en soit, les pertes par lixiviation apparaissent comme relativement constantes et pratiquement indépendantes du traitement du sol ou du type de culture (sauf en cas d'apport massif de soufre par les engrais).

Les auteurs de ce travail concluent en supposant que la dynamique du soufre est en définitive, dans ces sols, assez voisine de celle de l'azote.

CONCLUSION

=====

Bien que l'on ait reconnu depuis une quinzaine d'années, les besoins en soufre des sols tropicaux d'Afrique francophone, surtout dans la zone des savanes, il a fallu attendre l'année 1970 pour voir apparaître une méthode de dosage du soufre dans les sols,

adaptée aux sols tropicaux et utilisable en grande série. Elle n'a, cependant, pas encore été éprouvée sur une grande échelle.

Il est probable que son application permettra de résoudre un certain nombre de questions restées sans réponse comme les teneurs-limite pour l'apparition des carences, les interactions soufre-azote ou soufre-carbone, ou encore les relations du soufre et du type d'humus (humus de forêt et humus de savane).

Si l'on sait, dans la pratique, corriger les déficiences en soufre, on connaît encore mal la dynamique de cet élément dans les sols tropicaux.

C H A P I T R E IX

OLIGO-ELEMENTS, CARENCE ET TOXICITE

BORE, MOLYBDENE, ^{Cuivre} CUIVRE, ZINC, MANGANESE

Dans l'ensemble les oligo-éléments ont été relativement peu étudiés pour eux-mêmes en Afrique tropicale francophone (PINTA 1962 et 1964).

Une mise au point en sera prochainement réalisée dans les publications O.R.S.T.O.M. par M. PINTA et Melle AUBERT.

Ce n'est qu'à l'occasion de la découverte de carence ou de toxicité que des études un peu précises furent réalisées ; les résultats obtenus sont parfois assez disparates.

1 - BORE

====

1.1. Principales carences.

Sur palmier à huile (*Elaeis Guineensis*) Côte d'Ivoire.

Lorsque le sol contient moins de 0,2 à 0,1 p.p.m. de bore, on constate des carences en bore. (OLLAGNIER et VALVERDE 1968, MARTIN G., I.R.H.O. 1969).

Les auteurs n'ont pas donné de références précises sur les types de sol considérés ; mais l'une au moins des carences signalées se trouve sur le sol ferrallitique très désaturé sableux de La Mé : en surface 0-30 cm : (1^{er} Argile 12 %, Limon 8 %, Sables fins 24 %, Sables grossiers 56 %, S = 1,05 m.é./100 g ; Ca = 0,58 m.é./100 g ; Mg = 0,36 m.é./100 g ; K = 0,04 m.é./100 g ; pH = 5,0).

Sur cotonnier.

D'après BRAUD et al. (1969), on a trouvé des carences en bore :

à Yaoué, Tchad.

à Maroua, Cameroun.

à Tantege, Dahomey.

à Tikem, Tchad (carence latente).

Ni les types de sol, ni les teneurs en bore des sols ne sont indiquées, les carences ayant été déterminées par diagnostic foliaire uniquement.

BOUCHY (1970) signale également des carences en bore sur cotonnier dans les savanes de Côte d'Ivoire) sols ferrallitiques moyennement à peu désaturés et sols ferrugineux tropicaux lessivés)./Bananier : carences constatées par CHARPENTIER et MARTIN-PREVEL (1967) (sols ferrallitiques et sols hydromorphes)./Eucalyptus : une carence en bore existe en Haute-Volta (BIROT (1967).

1.2. Toxicité.

On ne signale aucun cas de toxicité du bore.

1.3. Correction des carences.

Ces carences sont assez aisément corrigées par des applications de borate agricole au sol, 50 g par arbre (7 à 8 Kg à l'hectare) sur palmier à huile (MARTIN G. I.R.H.O., 1969), 10 à 30 g par arbre sur eucalyptus (BIROT 1967).

1.4. Influence du chaulage sur les carences en bore.

CHARPENTIER et MARTIN-PREVEL (1967) pensent que les carences en bore du bananier sont habituellement dues à un chaulage excessif (brusque relèvement du pH).

1.5. Interaction du bore et d'autres éléments minéraux.

Une carence en bore a été induite, sur palmier à huile au Cameroun, par une fumure potassique.

On soupçonne à cette occasion qu'il puisse y avoir une interaction Bore x Potassium (QUILLON 1962).

A noter que la carence en bore des cotonniers de Tanta, au Dahomey, est survenue à la suite de l'utilisation d'une assez forte fumure minérale (BRAUD et al. 1969).

2 - MOLYBDENE

=====

On a trouvé dans les sols des bananeraies de Côte d'Ivoire (sols ferrallitiques moyennement à très désaturés et sols hydromorphes tourbeux) des taux de molybdène de 0,01 à 0,06 p.p.m. (Mo extractible à l'acétate d'ammoniac) dont le bananier semble parfaitement s'accomoder (DABIN et LENEUF 1960).

2.1. Principale carence.

Le molybdène étant un élément essentiel pour les rhizobiums des légumineuses, élément sans lequel ils ne peuvent fixer d'azote atmosphérique dans leurs nodosités (ANDERSON 1956, EVANS 1956), il n'est pas étonnant que la seule carence signalée en Afrique tropicale francophone le fut sur une culture d'arachide. Ce fait a été constaté dans les sols ferrugineux tropicaux très sableux de Louga (Nord-ouest du Sénégal). Les teneurs du sol en molybdène n'ont pas été indiquées (MARTIN et FOURRIER 1965).

2.2. Toxicité.

Aucun cas de toxicité n'a été signalé.

2.3. Correction des carences.

Une application de 28 Kg de molybdate d'ammonium provoque une augmentation de 10 % de la récolte d'arachide (témoin sans Mo : 1765 Kg/Ha) à Louga (MARTIN et FOURRIER 1965).

Actuellement on mélange du Molybdène aux produits anticryptogamiques destinés

à la désinfection des semences dans le nord du Sénégal.

2.4. Influence du chaulage sur le Molybdène du sol et interaction Ca-Mo.

La réaction du Molybdène est l'inverse de celle de beaucoup d'oligo-éléments : plus le pH augmente, plus son assimilabilité croît.

D'ailleurs l'influence favorable des apports de calcium sur l'assimilation du Molybdène a été démontrée au U.S.A. sur le Soja (PARKER et HARRISON 1962).

Toutefois, si on constate au Sénégal une action dépressive des bas pH ($\text{pH} \leq 5$) sur la survie du rhizobium dans le sol et sur la formation des nodosités (BLONDEL 1970 a), il ne semble pas qu'un abaissement accidentel du pH par la suite nuise à la fixation d'azote par les nodosités dès qu'elles sont bien formées (BLONDEL 1970 b). Il serait bon de vérifier s'il n'y a pas une interaction positive Ca x Mo.

3 - CUIVRE ET ZINC

=====

DABIN et LENEUF (1960) ont trouvé dans les bananeraies de Côte d'Ivoire (sols ferrallitiques et sols hydromorphes tourbeux), les teneurs suivantes :

- Cuivre : teneurs les plus fréquentes 0,2 à 1,5 p.p.m. (extrêmes 0,4 et 0,11 p.p.m.),
- Zinc : teneurs les plus fréquentes 0,4 à 4 p.p.m. (extrêmes 0,2 et 13 p.p.m.).

Ces auteurs pensent que les taux les plus élevés correspondent à un enrichissement dû aux impuretés contenues dans les engrais et amendements. (phosphates tri-calciques en particulier) apportés à haute dose sur ces sols.

3.1. Carence.

On n'a pas signalé de carence en cuivre et en zinc dans les sols d'Afrique tropicale francophone lorsque leurs caractéristiques n'ont pas été modifiées, par un chaulage par exemple. Il existe, par contre, des carences sur bananiers provoquées par un brusque relèvement du pH (voir § 3.4.).

3.2. Toxicité.

Aucun cas de toxicité n'a été découvert pour le cuivre et le zinc.

3.3. Correction des carences.

Une carence en Cu sur bananier a été guérie par une pulvérisation de fongicide cuprique sur les feuilles alors que l'application de 15 à 20 Kg de cuivre-métal sur le sol n'avait donné aucun résultat (MOITY 1961).

3.4. Influence des amendements calcaïques sur les carences.

Le blocage d'oligo-éléments semble être plus dû à une variation brutale du pH à la suite d'apports de chaux, de calcaire ou de dolomie qu'à une action propre des ions Ca et Mg.

MOITY (1954) a constaté en Guinée une carence en zinc sur bananier après un relèvement brusque du pH au-delà de 6,5 (pH initial non indiqué mais probablement voisin de 4,5) malgré des teneurs en zinc du sol comprises entre 8 et 10 p.p.m., teneurs exceptionnelles dans les bananeraies de Côte d'Ivoire qui ne présentent pourtant aucun signe de carence.

3.5. Interactions Cuivre-Matière organique.

Le relèvement du pH avait été extrêmement modeste (pH 4,1 à 4,3 au départ, pH 5,0 après apport d'amendements calcaires) dans le cas de carence en Cuivre signalé par MOITY (1961) dans une bananeraie de Côte d'Ivoire. Il est possible qu'il s'agisse ici d'un phénomène complexe assorti d'un blocage du Cuivre par la matière organique dans les sols torréaux de cette plantation.

4 - MANGANESE

=====

Le manganèse est peut-être l'oligo-élément qui a donné le plus de soucis aux chercheurs moins d'ailleurs par suite de carences que par suite de sa toxicité à bas pH.

Les méthodes d'analyse très variées (extraction à l'eau carbonatée, à l'acétate

d'ammonium, à différents pH) pas toujours signalées par les auteurs, la multiplicité des appellations employées par les analystes (Manganèse total; hydrosoluble, échangeable, réductible...) ne simplifient pas l'approche du problème.

La dynamique du manganèse paraît étroitement liée au pH du sol : un abaissement du pH provoque une réduction du manganèse tetravalent normalement insoluble en manganèse divalent nettement plus soluble.

C'est ainsi que dans les sols ferrallitiques désaturés argileux (70 % d'argile en surface) de la vallée du Niari au Congo-Brazzaville, la quantité de Manganèse extractible à l'acétate d'ammonium (tamponné au pH du sol) quintuple lorsque le pH passe de 5,3 à 4,7 (6,3 p.p.m. à 32 p.p.m. de Mn) ; pour pH 4,3 et pH 4,2, on trouve des valeurs nettement plus fortes de manganèse échangeable, respectivement de 106 p.p.m. et de 143 p.p.m.

Si on utilise l'extraction à l'eau carbonatée, on n'extrait rien lorsque le pH est supérieur à 5,3 (d'après FRANQUIN 1958).

A propos de l'influence du pH sur la solubilité du manganèse, on constate que l'acidification du sol pour les engrais azotés favorise l'absorption du manganèse par le Coffea canephora var. robusta (LOUE 1960, FORESTIER et BELEY 1969).

4.1. Les carences.

Les cas de carences sont relativement rares : on^{en} a signalé sur sisal en République Centrafricaine pour des teneurs du sol inférieures à 60 p.p.m. de manganèse total (BOYER 1956) sur des sols ferrallitiques faiblement désaturés et sableux (pH 5,6 à 5,9), et peut-être sur Arachide au Sénégal où BOUYER et COLLOT (1950) et COLLOT (1952) constatent une légère amélioration des rendements après apport de fortes doses de sulfate de manganèse (40 à 60 Kg/Ha) ; mais il est possible que cette action fut due uniquement au soufre du sulfate dont l'importance n'avait pas encore été reconnue à cette époque.

Le cocotier serait sensible aux carences en Manganèse ; celles-ci n'ont pas été signalées en Afrique occidentale mais sur les atolls coraliens du Pacifique (FREMOND et NUCE de LAMOTHE 1968).

4.2. Toxicité due au manganèse.

Plusieurs cas de toxicité manganique ont été reconnus au Congo-Brazzaville pour le cotonnier et l'arachide sur les sols ferrallitiques désaturés de la vallée du Niari (PREVOT, OLLAGNIER, AUBERT et BRUGIERE 1955, FRANQUIN 1958), au Tchad pour le cotonnier sur des vertisols (MEGIE 1960) et en Côte d'Ivoire, pour le cotonnier également, sur des sols ferrallitiques (BOUCHY 1970).

A noter qu'en Ouganda, CHENERY (1954) a trouvé des toxicités manganiques pour le bananier, le maïs et les fèves sur vertisols (pH 6,2 à 6,5, teneurs en manganèse 200 à 400 p.p.m.), alors que théier, canne à sucre, soja et patate douce croissaient normalement sur ces sols.

Les seuils de toxicité indiqués par FRANQUIN (1958) sont au Congo-Brazzaville (Mn extractible à l'acétate de NH_4 au pH du sol) :

- Arachides : pH 4,4 à 4,6, Mn vers 80 à 100 p.p.m. ,
- Cotonnier : pH 5,1 à 5,2, Mn vers 10 à 13 p.p.m.

En Côte d'Ivoire, des teneurs supérieures à 10 p.p.m. de Mn dans le sol (extraction à l'eau carbonatée) associées à un pH de 5,0-5,1 provoquent le dépérissement des cotonniers (BOUCHY 1970).

En Côte d'Ivoire également, DABIN et LENEUF (1960), après avoir trouvé dans les sols de bananeraie des teneurs en Manganèse échangeable (extraction acétique) de 3 à 1788 p.p.m., craignent qu'un abaissement trop prononcé du pH puisse provoquer une toxicité dans les sols contenant plus de 100 p.p.m. de Mn ; mais ces auteurs ne semblent pas avoir observé de cas où cette toxicité soit manifeste.

4.3. Corrections des toxicités et influence des amendements calciques.

Plus que les carences, les toxicités ont attiré l'attention des agronomes. Etant donné la liaison étroite entre bas pH et teneurs élevées en Manganèse soluble, les apports de chaux, calcaire ou dolomie broyés sont tout indiqués.

Effectivement un relèvement du pH par ce moyen corrige les toxicités (FRANQUIN 1958, MARTIN 1959 au Congo-Brazzaville) pourvu que l'on réussisse à dépasser les seuils critiques de pH ; on assiste alors à une diminution du taux

de Manganèse absorbé par les plantes cultivées.

Les chaulages ne sont pourtant pas aussi largement utilisés qu'ils devraient l'être probablement à cause de leur prix de revient.

Une amélioration de la structure peut également provoquer une disparition des toxicités dans certains cas ; dans les vertisols de Bongor, au Tchad, la structure, très dégradée lors des premières pluies, s'améliore ensuite, entraînant grâce à une meilleure aération une disparition des conditions réductrices donc un relèvement du pH et, par suite, une atténuation des symptômes de toxicité manganique sur le cotonnier.

L'adjonction au sol de calcaire ou d'adjuvant, comme le Krilium, en améliorant la structure provoque la même amélioration sur la végétation des cotonniers (MEGIE 1960).

4.4. Interactions de Manganèse et des autres éléments du sol.

L'absorption exagérée du Manganèse trouble le métabolisme de la plante :

- En solution hydroponique : un excès de Manganèse provoque une absorption importante de phosphore, azote et magnésium et un déficit alimentaire en potassium pour l'arachide (LEVEQUE et BELEY 1959).
- Dans les sols : un excès de Manganèse induit des carences en cuivre et soufre pour le caféier et peut engendrer un déséquilibre du rapport Mn/Fe pour cette plante, ainsi qu'une absorption exagérée de potassium et de calcium (FORESTIER et BELEY 1966).

Cette remarque à propos du rapport Mn/Fe peut être rapprochée des conclusions de YAMASAKI (1964) qui constatait qu'au Japon, une carence du sol en manganèse provoquait une toxicité du fer pour le riz. On a donc affaire ici à un véritable antagonisme Manganèse-Fer.

D'autre part, la toxicité du Manganèse pour l'arachide serait due à une diminution excessive du taux de calcium dans le sol ; l'augmentation des valeurs du rapport Mn/Ca du sol provoque une absorption trop forte du Mn et un déficit en Ca (MARTIN G. 1964). Il s'agit donc ici d'un nouvel antagonisme Manganèse-Calcium cette fois.

Si on pousse jusqu'au bout cette hypothèse, la baisse du pH qui accompagne la diminution des taux de calcium dans le sol ne serait plus qu'un phénomène parallèle favorisant certes la toxicité du manganèse mais somme toute accessoire (MARTIN, 1964).

Les toxicités manganiques s'associent souvent à des toxicités dues aux ions Al^{+++} des sols (MARTIN et PELLOUX 1970). On ne sait s'il s'agit d'une interaction $Mn \times Al$ ou d'une simple co-existence de ces ions tous les deux toxiques.

Enfin, lors de la mise en évidence des accidents causés par le manganèse aux cultures de la vallée du Niari (Congo-Brazzaville), on a tenté avec quelques succès en 1954, d'ajouter des matières organiques au sol, celles-ci ayant, dans une certaine mesure, corrigé les effets néfastes des fortes teneurs du sol en Manganèse à défaut d'avoir beaucoup relevé le pH. Les essais ne semblent pas avoir été poursuivis assez longtemps pour avoir une idée précise du mode d'action de la matière organique.

CONCLUSION

=====

Une vingtaine d'années d'études sur les oligo-éléments en Afrique ont permis de faire progresser notablement nos connaissances ; on connaît maintenant des cas de carences en bore, molybdène, cuivre et zinc plus rarement de manganèse, sur un certain nombre de plantes (palmier à huile, arachide, cotonnier) et dans la plupart des cas, on sait comment y remédier. Parfois, même, on peut relier l'apparition des phénomènes de carence à des valeurs des teneurs en oligo-éléments dans le sol (cas du bore). On a pu, dans quelques cas, discerner l'influence d'un apport d'amendements calcaïques sur le développement des carences (Bananier).

Quant aux toxicités engendrées par un excès de ces éléments, seule celle qui est due au Manganèse a retenu l'attention jusqu'à ce jour. Elle a été particulièrement étudiée sur arachide et cotonnier et on a mis en évidence une relation nette entre pH du sol et teneurs en Manganèse soluble et soupçonné l'existence d'antagonismes $Mn-Ca$, $Mn-Fe$ et Mn -matière organique.

Dans ce cas, il s'agit plus d'observations de terrain que de véritables études expérimentales qui sont encore à réaliser.

Le petit nombre d'expériences de chaulage ne permet pas non plus de se faire une idée précise sur l'importance du relèvement du pH et de l'apport d'ions calcium dans le développement des carences en bore, cuivre et zinc ou la régression de celles qui sont dues à un déficit de molybdène, ou des toxicités dues au Manganèse.

Les liaisons qui doivent exister entre d'une part Molybdène, Calcium et pH du sol et d'autre part, rhizobium de l'arachide, auraient besoin d'être précisées.

En outre, on connaît très mal l'importance de la matière organique sur la dynamique des oligo-éléments (cas du Cuivre, du Manganèse...).

C H A P I T R E X

L'ALUMINE LE FER ET LA SILICE DES SOLS

ET LEURS RELATIONS AVEC LES PLANTES CULTIVEES

1 - ALUMINE

Comme pour le phosphore jusqu'à une date relativement récente, les études sur l'ion Al dans les sols souffrent de l'absence d'une méthode analytique correcte, bien adaptée aux sols tropicaux et aux dosages en série.

A ce sujet, il y a d'ailleurs une grande confusion : on ne sait pas exactement ce que représente l'alumine dite libre, extraite des sols tropicaux par les différentes méthodes utilisées.

Ce qui est certain, c'est que l'ion Al se trouve en grande quantité dans les sols tropicaux, qu'il a un très grand rôle dans la genèse de leurs composants et que la destruction des réseaux argileux en libère de fortes quantités (SEGALEN 1965 a et b, SEGALEN 1968, SEGALEN et LEAL SILVA 1969).

L'importance des ions Al pour les plantes, a été cependant peu étudiée en Afrique tropicale, peut-être parce que l'on a rarement constaté de toxicité bien caractéristique, celle-ci étant souvent associée à une toxicité manganique peu visible.

Elle a été mise en évidence par CASTAGNOL (1950), au Vietnam, sur les terres hautes ferrallitiques où elle se manifeste pour des pH inférieurs à 5,15, mais on n'a que peu de données pour l'Afrique. TOMLINSON (1957), en Sierra Leone, confirme cette toxicité sur riz sur des sols de mangrove pour des pH inférieurs à 5 (il s'agit d'une toxicité due, à la fois, au fer et à l'aluminium extraits à l'acétate de NH_4).

Il est probable, toutefois, que certaines déficiences des cultures sont imputables à des toxicités aluminiques du sol : KILIAN (1970), sur sols tourbeux de bananeraie à Madagascar, fait état d'une prétendue carence^{en} phosphore qui n'est, en réalité, qu'une toxicité due à Al (les phosphates la corrigent par apport de Ca et relèvement même faible du pH).

MARTIN pense que la toxicité manganique de la vallée du Niari est associée à une toxicité aluminique (MARTIN et PELLOUX 1970).

Une expérience, faite sur culture d'arachide en solution hydroponique (SAG 1956), montre que l'ion aluminium (apporté par du sulfate d'alumine) est toxique à forte dose, mais que cette plante convenablement alimentée en éléments minéraux et surtout en phosphore non seulement supporte ces doses toxiques, mais que celles-ci favorisent sa croissance, ce que semblent confirmer les observations de KILLIAN sur bananier à Madagascar.

On est donc amené à supposer l'existence d'un antagonisme Al/P qu'il serait intéressant de vérifier et de préciser.

HARDY et al. (1963) constatent d'ailleurs dans l'Arkansas que, si le pH est bas, Al et Fe diminuent l'assimilabilité du phosphore par les plantes.

En Uganda, CHENERY (1954), a constaté des excès d'Al à pH 3,9 (180 p.p.m), pH 4,5 (460 p.p.m) et pH 3,6 (265 p.p.m) qui nuisent à la croissance de la canne à sucre ; mais le théier supporte parfaitement ces teneurs en Al. Les excès d'Al sont généralement associés à des excès de Mn, d'après CHENERY.

En Afrique tropicale francophone, on n'a jamais étudié les relations entre Al toxique et pénétration des racines, peut-être parce que ces toxicités n'ont été que rarement constatées et pas toujours bien définies.

2 - FER ===

Malgré l'importance quantitative énorme de cet élément dans les sols tropicaux, le rôle des différentes formes du fer dans l'alimentation des plantes, n'a jamais été étudié à fond en Afrique francophone et les données sont très rares.

2.1. Peu de travaux sont venus confirmer les observations de TOMLINSON (1957) sur riz en sol de mangrove de Sierra Leone où fer et alumine extractibles à l'acétate de NH_4 s'accroissent considérablement lorsque le pH descend en dessous de pH 5, ou celles de PONNAMPERUMA (1958) à Ceylan, qui attribue au fer réduit solubilisé à des pH compris entre 4,3 et 4,9, la maladie bronzée du riz. Pourtant VIEILLEFON (1968) constate, qu'après drainage des mangroves de Casamance (sud du Sénégal), il se produit de fortes baisses de pH, d'où des inconvénients certains pour les cultures

(riz en particulier) inconvénients que l'on peut, sans doute, relier à la présence d'ion Al^{+++} et Fe^{++} dans les sols. En tout cas une expérience récente (1970) de chaulage a donné d'excellents résultats sur ces sols.

Il est toutefois possible que la toxicité des nitrites sur riz en milieu réducteur décrite par DABIN (1954) dans les sols argileux du Mali pour des pH proches de la neutralité, soit également due à la présence de fer réduit, peu soluble à ces pH mais qui obstrue les tissus vacuolaires des racines (PONNAMPERUMA 1954).

Une carence en fer (associée à une carence en lin) a été signalée en Polynésie (FREMONT 1965). On n'a pas, non plus, constaté de carence en fer par chlorose calcaire comme ce fut le cas sur riz en Californie (INGEBRETSEN et al. 1959).

Parmi les actions du fer sur les propriétés des sols étudiées en Afrique francophone, il faut signaler :

- une action du fer libre sur la structure mise en évidence par MARTIN (1963) dans les sols de la vallée du Niari (Congo-Brazzaville) riches en fer libre (8 à 10% de fer libre).
- une insolubilisation de phosphore du sol par le fer sous forme de composé phospho-ferrique, peu ou pas assimilable par les plantes (DABIN 1963, 1968, 1970-a).

La méthode CHANG et JACKSON d'étude des formes des phosphates dans les sols a donné un moyen d'étude efficace qui sera certainement mis à profit et qui, d'ailleurs, commence à l'être.

Pour le caféier, une bonne alimentation en fer correspondrait toujours à une bonne alimentation en potasse ; la présence de fer dans la plante conditionneront l'utilisation du potassium (FORESTIER et BELEY 1969). Des résultats plus ou moins semblables ont été précédemment signalés par HEWITT, BOLLE et JONES (1953) et PIRSON (1955).

En conclusion, on peut dire que peu de travaux ont été effectués en Afrique francophone sur l'action du fer du sol vis-à-vis des plantes cultivées.

3 - SILICE DANS LES SOLS TROPICAUX

=====
Dans l'ensemble, le rôle de la silice dans le développement des cultures, a été peu étudié dans les sols tropicaux ; pourtant il est certainement considérable. Les cendres végétales de la forêt dense congolaise sont composées de silice pour 50% (LAUDELOUT 1954) et dans les 15 tonnes annuelles/par hectare de matières sèches que cette forêt laisse tomber sur le sol, il y a environ 250 Kg de silice donc plus que d'azote (200 Kg). Il est bien connu que la silice a un rôle plastique important pour les graminées et les céréales en particulier.

Des travaux japonais sur le riz (OKUDA, TAKAHASHI 1964), ont d'ailleurs montré que le rôle plastique n'était pas le seul et que des apports de silice en solution favorisaient la croissance, l'épiaison, l'assimilation du phosphore, du manganèse et du fer, en même temps qu'une résistance accrue aux attaques des champignons.

Cette silice intervient dans le cycle biologique : tous les chimistes qui ont travaillé sur les horizons superficiels des sols tropicaux ont constaté des quantités importantes, parfois gênantes, de silice soluble ou en gel dans les solutions analysées, ainsi que l'a remarqué D'HOURE (1968).

En Afrique francophone, il existe très peu de travaux sur ce sujet.

Etudiant les produits amorphes dans les sols tropicaux, SEGALIN (1968) et SEGALIN et LEAL SILVA (1969), concluent qu'il n'existe pas de silice non cristallisée autre que celle des argiles au moins en quantité dosable par les méthodes employées, sauf dans les sols à allophanes (Andosols et sols andiques) ; mais il existe dans ces sols un "effondrement" des réseaux argileux, plus important dans le cas des sols à montmorillonite que des sols à kaolinite. Certains auteurs admettent même que cette destruction de l'argile pourrait expliquer la diminution des taux d'argile des horizons supérieurs des sols ferrallitiques (DUCHAUFOR et LELONGE 1967).

Il y a donc dans les sols tropicaux, une libération permanente de silice et d'aluminium mobile.

D'autre part, on sait que, sous ces climats agressifs, il y a une corrosion intense du quartz de la roche-mère, donc également une libération de silice sous forme soluble ou pseudo-soluble (LENEUF 1959).

Toutes les observations faites semblent confirmer que, dans les 2 cas, cette silice est rapidement entraînée en dehors du profil, mais il est très possible qu'au passage elle ait un rôle important pour les plantes ; celui-ci n'a pas été étudié en Afrique francophone, pas plus d'ailleurs que la mise hors du circuit biologique de la silice des végétaux par insolubilisation lors des feux (D'HOORE 1968) (feux de brousse en savane, incinération de la forêt lors des défrichements).

Une autre question qui pourrait probablement présenter de l'importance, n'a jamais été étudiée dans les régions que nous envisageons ici : l'interaction possible des ion Si^{4+} et P^{5+} dans l'alimentation en phosphore des plantes.

C H A P I T R E X I

=====

EVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURE

=====

L'agriculture africaine est traditionnellement une agriculture itinérante ; l'emplacement des cultures change constamment ; après quelques années d'occupation, le sol retourne à la jachère pour un temps indéterminé mais généralement suffisant pour que la végétation arbustive repousse vigoureusement.

La faible durée des périodes de cultures (rarement plus de 4 ans) ne permet guère à l'agronome de faire d'autres observations que celle d'une érosion souvent catastrophique (SEGALEN 1967). Une étude précise demande des cas limites où la culture a été continue pendant de nombreuses années ; ces cas existent parfois en culture africaine :

- culture continue de mil, au Tchad, pendant une dizaine d'années jusqu'à épuisement du sol (BEZOT 1965).
- culture continue de coton dans la région de Korhogo en Côte d'Ivoire pendant 5 à 6 ans (BOUCHY 1970) etc...

ils sont néanmoins assez rares et n'ont pas fait l'objet d'observations suivies.

Par contre, les graves problèmes soulevés par l'intensification agricole, la culture mécanisée, l'emploi de variétés sélectionnées et l'utilisation d'engrais minéraux, ont retenu l'attention des chercheurs. Que ce soit dans les stations de recherches ou les entreprises mécanisées de Casamance (sud du Sénégal) et de la vallée du Niari (Congo-Brazzaville), un travail considérable a été effectué, malheureusement encore incomplètement publié.

Malgré ces lacunes, il paraît possible de dresser un schéma d'ensemble des données actuellement acquises.

Ce chapitre concernera surtout des cultures annuelles (cultures de rente et

Après défrichement de la forêt, on obtient les chiffres suivants sur des parcelles ayant 7% de pente :

- en sol nu : pertes en terre 120 t/Ha, soit 600 fois celles de la forêt, ruissellement : 29,4% de la pluie

- première année de culture

pertes en terre : 2 à 4 t/Ha

ruissellement : 15 à 20% de la pluie.

Cette érosion se produit essentiellement pendant la période où le sol est encore mal couvert par les cultures ; dès que la végétation est dense, les pertes en terre deviennent très faibles. C'est ce qui se passe dans les plantations pérennes de bananiers, caféiers, cacaoyers et palmiers à huile où le sol toujours abrité par la plante cultivée et la couverture verte ne s'érode pas plus que sous forêt.

1.2.2. Sols ferrallitiques peu désaturés argilo-sableux du centre de la Côte d'Ivoire (BERTRAND 1967).

On enregistre les chiffres suivants sous une pluviométrie de 1.228mm et avec la rotation quadriennale Ignames, Maïs -Coton, Riz et jachère :

:	:	Pertes en terre	:	Ruissellement	:	Indice	:
:	:	sur 4 ans	:	sur 4 ans	:	de pluie	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	Culture sans	28 t/Ha	:	415mm	:	1612	:
:	précaution	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	Culture faite	4 t/Ha	:	120mm	:	1561	:
:	avec précautions	:	:	:	:	:	:

Ces précautions consistent en un cloisonnement des buttes d'ignames, en une bonne orientation et un cloisonnement des billons de maïs et de coton, le riz étant cultivé à plat ; le tableau précédent indique qu'elles ont une efficacité certaine.

1.2.3. Sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux sableux de Casamance - sud du Sénégal - (FAUCK 1955, COINTEPAS 1956, ROOSE 1967-d, CHARREAU 1969).

Ces sols sableux (à sable fin), mal structurés, sont extrêmement sensibles

à l'érosion dès que la pente dépasse 1%. Voici les résultats observés en 1956 sous une culture mécanisée d'arachide :

1956	Pourcentage de pente		
Arachides	1,25%	1,50%	2%
Ruissellement % de la pluie	9,4	18,2	42,5
Perte en terre tonne/Ha	3,05	4,62	11,96
Rendements en arachide Kg/Ha	2124	1948	1840

On peut se rendre compte ainsi que l'augmentation même faible du degré de pente accélère considérablement l'érosion, avec comme corollaire une diminution des rendements en arachide.

1.3. Importance qualitative des pertes par érosion.

Tous les auteurs qui ont étudié les phénomènes érosifs dans les cultures soulignent que ce sont les éléments fins du sol (argile et limon), ainsi que les matières organiques qui sont entraînées de préférence par les eaux de ruissellement.

Or, ces éléments fins forment le support essentiel de la fertilité des sols.

ROOSE (1967-c) cite les chiffres indiqués ci-dessous pour une perte en terre (érosion en nappe) de 20 T/Ha/an assez habituelle dans un champ d'ignames ou de manioc en Côte d'Ivoire :

440 Kg de carbone organique

53 Kg d'azote

23 Kg de phosphore (P_2O_5)

71 Kg de chaux (CaO)

23 Kg de magnésie (MgO)

35 Kg de potasse (K_2O)

103 Kg de soude (Na_2O)

ce qui correspond à 3,6 tonnes de fumier (à 12,3% de carbone), 240 Kg de dolomie

(30% CaO et 20% MgO), 60 Kg de chlorure de potassium, 250 Kg de sulfate d'ammoniaque et 130 Kg de superphosphate à 18% de P_2O_5 .

L'érosion ajoute donc ses effets à la lixiviation des éléments fertilisants par drainage ; on peut la considérer comme un lessivage superficiel particulièrement nocif. Elle joue d'ailleurs un rôle fondamental dans le processus "d'appauvrissement" superficiel des sols en argile.

1.4. Comment éviter ou limiter l'érosion ?

Les techniques antiérosives décrites dans la littérature, cultures en courbes de niveau ou avec bandes d'arrêt, cultures alternées, terrasses d'absorption ou de diversion, sont bien connues des agronomes d'Afrique francophone : non seulement ces techniques sont largement utilisées dans les stations de recherche, mais elles font leur apparition avec plus ou moins de bonheur et de persévérance en culture africaine (région de Korhogo en haute Côte d'Ivoire, paysannats de la République Centrafricaine etc...) ; il est donc inutile de revenir sur ce point.

Signalons simplement que des adaptations sont nécessaires localement : en Casamance, la grande susceptibilité des sols à l'érosion interdit pratiquement de cultiver des pentes supérieures à 1% si l'on ne veut pas effectuer une mise en défens par banquettes et terrasses ; ces dernières ne permettent d'ailleurs pas de cultiver des pentes supérieures à 3-4% (FAUCK 1955, COINTEPAS 1956).

Sur les sols ferrallitiques sablo-argileux ou argilo-sableux mieux structurés de Côte d'Ivoire ou de République Centrafricaine, on peut cultiver sans grand danger des pentes de 2% et parfois 3%, pourvu toutefois que la baisse de perméabilité qui suit le défrichement ne soit pas trop forte (BOYER et COMBEAU 1960) ; terrasses et banquettes bien faites pourraient autoriser la culture jusqu'à 5 et 6% de pente.

Actuellement, un certain nombre de points retiennent l'attention des chercheurs.

1.4.1. L'influence des labours à la charrue.

A condition qu'il soit correctement effectué (labour en bande orientée suivant les courbes de niveau, en terrasses etc...), le labour à la charrue en accroissant la perméabilité du sol réduit l'érosion par rapport à la culture manuelle (DABIN et LENEUF 1958, VERNEY et WILLAINE 1965, CHARREAU 1969).

1.4.2. Incidence des billons et du cloisonnement des billons.

La méthode utilisant des billons, de préférence cloisonnés à courts intervalles, a de chauds partisans (FAUCK 1955 en Casamance, BERTRAND 1967 en moyenne Côte d'Ivoire, VERNEY et WILLAINE 1965 au Togo, BIROT et GALABERT 1967 au Niger).

Toutefois, CHARREAU (1969) fait remarquer qu'en Casamance la rupture en chaîne des billons peut entraîner des dégâts catastrophiques, pires que l'érosion en nappe d'un sol à plat.

1.4.3. Incidence de l'enracinement fasciculé des plantes.

En particulier, les racines des graminées forment un chevelu très dense dans la partie superficielle de l'horizon cultivé et constituent, de ce fait, une armature qui retient le sol ; en outre, elles favorisent l'agrégation des particules du sol ; tout ceci est bien connu pour les graminées de prairies, mais existe également, dans une mesure moindre mais non négligeable, pour les céréales cultivées. C'est ainsi que FAUCK (1954-b) constate qu'une culture de riz pluvial en Casamance, ne diminue guère le ruissellement mais réduit sensiblement les pertes en terre ; la même remarque a été faite en Côte d'Ivoire (BERTRAND 1967).

1.4.4. Importance de la couverture du sol.

Tous les auteurs soulignent que le sol est extrêmement sensible à l'érosion pendant la période comprise entre les façons culturales de préparation du terrain et le moment où la plante cultivée possède une végétation suffisante pour amortir l'impact des gouttes de pluie et favoriser ainsi la pénétration de l'eau dans le sol.

Il existe donc un intervalle de temps critique, d'autant plus redoutable qu'il correspond le plus souvent aux précipitations brutales du début de la saison des pluies (BERTRAND 1967, CHARREAU 1969). D'où les précautions suivantes :

- conserver ou redonner au sol une bonne perméabilité par un labour avec enfouissement d'engrais vert (au moins en zone semi-humide)
- et surtout semer le plus tôt possible (CHARREAU 1969) dès les premières pluies pour que la plante couvre rapidement le sol.

Cette importance de la couverture du sol joue également lors de la mise en jachère un fin du cycle cultural : en zone humide, la végétation naturelle

repousse vite et vigoureusement (sauf évidemment si le sol a été fortement dégradé), mais en zone semi-humide le terrain se couvre parfois mal de plantes spontanées ou trop lentement, et l'on observe les mêmes inconvénients qu'au moment de la levée d'une plante cultivée.

Il faut aussi se rendre compte de ce qu'une culture mal faite couvre très mal le sol et que les phénomènes érosifs jouent alors à plein, pratiquement comme un sol nu. C'est une des raisons, parmi d'autres, qui font dire aux agronomes travaillant en Afrique qu'une culture ratée abîme plus le sol que plusieurs bonnes récoltes.

2 - L'ECONOMIE DE L'EAU APRES DEFRICHEMENT

=====

Les problèmes de l'eau dans les sols cultivés ont été fort peu étudiés en Afrique tropicale francophone sous l'aspect d'une comparaison entre les terres vierges et les terres sous culture ; il faut ajouter que l'on admet habituellement l'hypothèse que l'évapotranspiration réelle provoquée par une culture est à peu près la même que celle de la végétation naturelle.

On s'est surtout efforcé d'évaluer les besoins des plantes pour éventuellement les satisfaire par une irrigation de complément.

Les principales conclusions dégagées sont les suivantes :

- la teneur en eau du sol sous une tension déterminée (correspondant à des valeurs remarquables de p_f) est surtout fonction de la teneur du sol en éléments fins et en matières organiques (OLLAT et COMBEAU 1960, THOMANN 1963).
- le domaine d'eau utile est plus important en sols sableux et surtout sablo-limoneux qu'en sols argileux (COMBEAU et QUANTIN 1963, OCHS et OLIVIN 1965).
- l'amoullissement superficiel du sol augmente le taux d'humidité en fin de saison sèche (GAUDEFROY-DEMONBYNES et CHARREAU 1961) au moins dans les divers types de sol du Sénégal.
- le paillis superficiel est excellent pour maintenir l'humidité d'un sol (FORESTIER 1959 et BOYER 1964, sous caféier), mais en zone humide il devrait être employé avec

la plus grande prudence, car sa présence facilite l'entraînement des bases par drainage et donc l'acidification prononcée du sol (FRANQUIN et MARTIN 1962 dans la vallée du Niari, Congo-Brazzaville).

On peut rattacher à ce phénomène la stérilisation des terres après une ou plusieurs années de dénudation, toujours dans la vallée du Niari : primitivement attribuée à une dégradation accélérée des matières organiques (JULIA 1953, BRUGIERE 1954), elle semble surtout due à la lixiviation des bases, à la baisse de pH qui en découle et surtout aux toxicités manganiques apparues aux bas pH atteints par le sol (PREVOT, OLLAGNIER, AUBERT et BRUGIERE 1955, FRANQUIN 1958, MARTIN 1964).

A propos de l'intensité du lessivage dans ces sols du Niari, FRANQUIN et MARTIN (1962) et MARTIN (1964) soulignent une notion que l'on aurait peut-être tendance à oublier : pour combattre efficacement les effets de percolation de l'eau dans le sol, la plante doit présenter un maximum d'évapotranspiration réelle au moment des plus fortes chutes de pluies qui se situent ici à la fin de la saison humide, c'est-à-dire avril et mai ; or, ce n'est absolument pas le cas des plantes cultivées mûres à cette époque ou des graminées qui commencent à se flétrir ; par contre le Stylosanthes gracilis, alors en pleine végétation, s'est révélé un excellent "évaporateur".

- les pluies sont insuffisantes pour couvrir les besoins des plantes, soit parce que le maximum des pluies ne correspond pas, dans le temps, à la demande maximum des plantes (régions humides), soit parce que l'ensemble des précipitations n'atteint pas la quantité d'eau nécessaire (régions sèches).

Ce dernier cas est particulièrement net dans le delta central du Niger où le cotonnier a besoin durant son cycle végétatif d'environ 7500m^3 au total, alors que les pluies ne lui en apportent que 3500 en moyenne (I.R.C.T. 1967).

Au Sénégal, CHARREAU (1961-b) estime que les besoins en eau sont de $6500\text{m}^3/\text{Ha}$ pour le mil et de $4000\text{m}^3/\text{Ha}$ pour l'arachide.

Même en zone humide, le palmier à huile a besoin au Togo, au Dahomey et même en Côte d'Ivoire, d'un complément d'eau apporté par irrigation pour avoir une fructification optimum (OCHS 1968).

L'importance du problème de la lixiviation des bases en culture irriguée n'a pas échappé aux chercheurs (CHAMPION 1961, CHARREAU 1961-b, OCHS 1968), mais la mise en pratique s'avère délicate, car il faut ajuster exactement les doses d'irrigation au déficit

hydrique du sol et à sa capacité au champ.

En dehors des cultures irriguées du Mali et des bananeraies de Côte d'Ivoire, on peut dire que la technique des irrigations n'a pas encore dépassé le cadre des stations de recherches.

La mise en place, en cours ou en projet, de plantations industrielles de canne à sucre au Sénégal, au Niger et en Côte d'Ivoire va certainement donner une autre dimension à ce problème.

3 - EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE

Les exemples les plus caractéristiques et les plus longuement étudiés proviennent des secteurs mécanisés de Casamance (sud du Sénégal) et de la vallée du Niari (Congo-Brazzaville) ainsi que d'un certain nombre de stations de recherches.

3.1. Le taux de matières organiques du sol baisse considérablement immédiatement après défrichement.

- En Casamance (sud Sénégal) - sols ferrallitiques faiblement désaturés et sols ferrugineux tropicaux sableux (11 à 13% d'argile de 0 à 25cm).

La teneur en matières organiques qui était de 2,2% dans le sol sous forêt sèche accuse une baisse brutale de 25 à 30% la première année (culture d'arachide) ; cette baisse continue la 2ème année de culture et le sol ne contient plus après le deuxième cycle cultural que 50 à 60% du taux initial de matières organiques (FAUCK 1955; FAUCK, MOUREAUX et THOMANN 1969; CHARREAU et FAUCK 1969).

- Dans la vallée du Niari (Congo-Brazzaville) - sols ferrallitiques très désaturés argileux (60 à 70% d'argile en surface).

La baisse des teneurs en matières organiques est nettement moins forte que dans les sols sableux de Casamance ; elle affecte également les parcelles en culture ou conduites en jachère nue, mais ceci dans une proportion acceptable :

	Savane témoin	Parcelles cultivées en arachide 3 ans	Parcelles nues 1 an	Parcelles nues 2 ans	Parcelles nues 3 ans
C%	2,8	2,15	2,6	2,25	2,3
N%	1,73	1,41	1,71	1,46	1,51
C/N	16,1	15,2	15,2	15,3	15,4

Tous les expérimentateurs confirment que, pour toute l'Afrique, le taux de matière organique diminue sensiblement après une mise en culture par rapport au sol primitivement sous savane ou sous forêt.

3.2. Les teneurs en matières organiques du sol cultivé continuent à baisser mais plus lentement les années suivantes et paraissent tendre vers un palier.

En Casamance (sud du Sénégal), après 15 ans de culture continue, le taux de matière organique de sols cultivés tend à se stabiliser pour l'horizon travaillé à la charrue (0 à 15-20cm) à peu près au niveau qui existe sous forêt à cette profondeur de 15-20cm (CHARREAU et FAUCK 1969).

Profondeur cm	Carbone organique %		Azote ‰	
	Forêt	Après 15 ans de culture	Forêt	Après 15 ans de culture
0 - 4	1,09	0,39	0,85	0,30
4 - 8	0,68	0,36	0,53	0,35
8 - 12	0,51	0,35	0,36	0,27
12 - 16	0,38	0,29	0,31	0,28
16 - 20	0,31	0,33	0,27	0,31

En République Centrafricaine - sols ferrallitiques faiblement désaturés de Bambari, RICHARD (1967-a et-b) constate que le taux de carbone organique continue à diminuer lentement après 10 ans de culture (0,95% de C organique en 1965 après 10 ans contre 1,14% après 4 ans et environ 1,60% au témoin sous savane), sans qu'ap-

paremment on puisse entrevoir une stabilisation.

En Côte d'Ivoire - sols ferrallitiques faiblement désaturés de Bouaké, - les teneurs en matières organiques paraissent se stabiliser après une chute brutale les 2 premières années (RICHARD 1967-a et-b).

En définitive, il semble que le palier atteint par les teneurs en matière organique soit assez variable suivant les sols, les régions et suivant les procédés culturaux utilisés.

3.3. Modification de la composition de l'humus du sol sous l'action de la culture.

En comparant les fractions des humus de forêt et des sols cultivés de Casamance, il apparaît que le passage de la forêt à la culture se traduit par une modification de la composition de l'humus ; la proportion d'acides humiques baisse tandis que le pourcentage d'acides fulviques augmente.

Notamment, on constate des changements même à l'intérieur de la fraction acides humiques : les acides humiques gris ont tendance à disparaître dans les sols cultivés ; il est vrai que la diminution de la teneur en bases échangeables et celle du pH créent des conditions plus favorables à la formation des acides humiques bruns ou libres qu'à celle des acides gris normalement liés aux cations du sol.

D'autre part, il semble que le taux d'humification des matières organiques augmente sous culture ce qui implique une diminution relative de la fraction humifiée plus faible que celle de la totalité du carbone organique (FAUCK, MOUREAUX et THOMANN 1969, CHARREAU et FAUCK 1969).

3.4. Les apports d'amendements organiques (fumier de ferme, paillis) et les restitutions de résidus de récolte n'empêchent pas la diminution des matières organiques ; ils la retardent simplement (RICHARD 1967-a et-b) ; l'évolution est irréversible et le taux final de matières organiques dépend en définitive de l'équilibre qui existe entre le sol et les cultures (CHARREAU et FAUCK 1969).

Pourtant MARTIN (1964) semble considérer qu'un apport annuel de 40 tonnes de fumier de ferme à l'hectare dans la vallée du Niari suffirait pour conserver aux terres cultivées la teneur en matière organique des sols de savane. Cet auteur reconnaît d'ailleurs qu'une telle fertilisation n'est pas à la portée de l'agriculture locale, ce qui explique sans doute qu'il n'y ait pas eu d'essais systématiques

faits pour confirmer cette hypothèse.

- 3.5. Le problème, en définitive, reviendrait à chercher quel est le niveau d'équilibre acceptable pour une exploitation rationnelle du sol. Un tel équilibre sera fonction, d'une part du rythme de culture et des façons culturales et, d'autre part, des propriétés demandées au sol (structure, porosité, richesse minérale etc...) et compatibles avec les cultures.

En Casamance, l'équilibre observé en 1965-1966 est obtenu après une succession culturale comprenant trois ans de culture et une année d'engrais vert graminéen enfoui, sans autre restitution au sol de matières organiques lignifiées que les racines du riz pluvial et du sorgho.

En Côte d'Ivoire, à la station de recherche de Bouaké, un certain équilibre a été atteint avec la rototation quadriennale suivante : ignames, maïs-coton, riz pluvial, stylosanthes.

Une mise en défens efficace contre l'érosion, l'enfouissement total des résidus de récolte (tiges et racines de maïs et de riz en particulier), a provoqué une remontée de la teneur en carbone organique qui en 4 ans est passée de 0,85% à 1,20% environ (LE BUANCC 1970), à Bouaké (Côte d'Ivoire).

Traditionnellement l'agriculture africaine utilise de longues périodes de jachère pour restaurer les taux de matières organiques et la fertilité du sol en général ; mais dans la plupart des cas, la diminution de la matière organique est peut-être plus à imputer à l'érosion qui ravage les terrains de culture qu'à la minéralisation des constituants organiques du sol pendant la période de mise en valeur agricole.

4 - EVOLUTION SOUS CULTURE DES BASES ECHANGEABLES ET DU pH

=====

Un sol couvert de végétation naturelle, savane ou forêt, possède un certain équilibre car la remontée des éléments minéraux à partir des racines des plantes compense alors à peu près la lixiviation des bases, d'où une grande stabilité.

4.1. La mise en culture provoque une rupture de cet équilibre.

En pays forestier, le défrichement s'accompagne d'une mise à feu de l'abatis forestier ; un tel brulis apporte au sol 2 Tonnes de sels minéraux (LAUDELOUT 1954 au Congo-Kinshassa). D'où un enrichissement considérable du sol en bases qui persiste assez longtemps : BUSCH (1958) constate en République Centrafricaine, 3 ans après le feu, que la somme des bases échangeables est encore de 11 à 19 m.é. pour 100 g au lieu de 2 à 3 m.é./100 g sous forêt, tandis que le pH primitivement de 5,7 à 5,8 peut varier en surface de 5,7 à 7,25 suivant la quantité de cendres. Il s'agit, il est vrai d'une jeune plantation de caféiers, où une plante de couverture diminue considérablement une lixiviation de bases que le sol léger (13 à 20 % d'argile en surface) devrait favoriser.

L'entraînement des bases sur défriche forestière est certainement beaucoup plus rapide avec des cultures annuelles, mais on ne possède pas de données chiffrées en pays francophone.

En région de savane, le brulis accompagne le plus souvent la jachère, mais l'apport d'éléments minéraux au sol est sans commune mesure avec ce que l'on observe en forêt : BOCKELEE-MORVAN (1964) observe que l'apport de la seule potasse au sol est pratiquement nul au Sénégal après brulis répété des herbes de savane.

4.2. Les pertes en bases par drainage et par exportation.

Au Sénégal, sols ferrubineux tropicaux peu lessivés sableux : TOURTE et al. ont trouvé les chiffres suivants pour le calcium et le magnésium en utilisant des bacs lysimétriques :

	Lessivage		Exportation	
	Ca O Kg/Ha	MgO/Kg/Ha	Ca O Kg Ha	MgO/Kg/Ha
Mil engrais vert	25	4,3	0	0
Jachère nue	77,6	38,9	0	0
Jachère naturelle brûlée	29,2	10,1	0	0
Arachide	55 à 71	9 à 16	105 à 130	30 à 43
Mil grain	111 à 158	22 à 48	30 à 86	6 à 26

Malgré un apport de 288 Kg/Ha de Ca O, (88 sur certains objets), principalement sous forme d'une Tonne de Phosphate tricalcique, le bilan du calcium est largement déficitaire en Ca pour les 4 années de la rotation (mil engrais vert-arachide-mil grain-arachide).

Evidemment, il s'agit là d'expériences en bacs lysimétriques de petite taille ; il est possible que des mesures faites "in situ" donnent des chiffres un peu différents, mais on peut penser que l'ordre de grandeur restera en gros le même et il est certain que le sens du phénomène sera identique.

En Casamance (Sud du Sénégal) : sols ferrugineux tropicaux lessivés sableux et sols ferrallitiques faiblement désaturés sableux. (FAUCK 1954 a ; FAUCK, MOUREAUX et THOMANN 1969 ; CHARREAU et FAUCK 1969).

La somme des bases échangeables accuse une diminution considérable, 40 à 50 % par rapport à la forêt témoin, au bout de 15 ans de culture pratiquement sans restitution au sol autre que les racines et les pailles de riz ; il en est évidemment de même pour le calcium échangeable qui forme la plus grosse part de ces bases et pour le magnésium dont la dynamique est la même (pour le potassium, on voudra bien se reporter au chapitre consacré à la potasse dans les sols).

La capacité d'échange, liée à la matière organique, décroît également dans une proportion similaire ; les résultats sont résumés dans les tableaux suivants :

	Sols ferrallitiques		Sols ferrugineux tropicaux	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
	Capacité d'échange de bases T			
Forêt - témoin	6,6	-	6,6	-
valeur moyenne				
Après 15 ans de culture	3,8	-	3,8	-
	Somme des bases échangeables			
Forêt - témoin	4,00	2,50	4,00	2,50
valeur moyenne				
Après 15 ans du culture	2,04	1,45	1,89	1,49

Calcium échangeable				
	Sols ferrallitiques		Sols ferrugineux tropicaux	
	0-15 cm		0-15 cm	
Origine	2,0 à 3,0		1,1 à 3,9	
Après 6 ans	1,1 à 1,5		1,1 à 1,5	
Après 15 ans	0,57 à 1,25		≤ 1	

Les pertes en chaux atteignent en 15 ans 1 à 4 Tonnes de Ca O par hectare presque'entièrement par lixiviation ; elles sont d'autant plus graves, qu'après 6 ans de culture ; il existe une corrélation étroite entre les rendements en arachide et les teneurs du sol en Ca échangeable.

Le pH accuse bien sûr une diminution parallèle (la question a été traitée au chapitre pH et rendement) ; le pH qui est ici de 6,40 sous forêt, tombe à 6,18 après 2 ans de culture, à 5,6-5,7 après 6 ans et se tient entre 4,6 et 5,10 après 15 ans.

Des résultats du même ordre avaient déjà été indiqués dans une étude sur les sols à arachides du Sénégal et spécialement de Casamance dès 1947 par G. AUBERT,

J. DUBOIS et R. MAIGNIEN (inédit).

Cette baisse est d'autant plus inquiétante qu'elle risque d'entraîner une diminution de la vie microbienne (en particulier des rhizobiums), l'insassimilabilité de certains oligo-éléments comme le molybdène, la réduction des composés du fer et une rétrogradation possible des phosphates (CHARREAU et FAUCK 1969).

Un apport d'amendements calcaïques (au moins 1 Tonne par hectare de chaux agricole) semble dès maintenant s'imposer pour éviter des accidents qui, lorsqu'ils se produisent se manifestent brutalement (BLONDEL 1970 a).

Dans la vallée du Niari au Congo-Brazzaville.

Sols ferrallitiques fortement désaturés argileux (60 à 80 % d'argile) (PREVOT, OLLAGNIER, AUBERT et BRUGIERE, 1955 ; FRANQUIN, 1958 ; FRANQUIN et MARTIN G., 1962 ; MARTIN G. 1963 et 1964 ; ROUZAUD, 1962).

Nous avons vu que dans ces sols les pertes en matières organiques étaient relativement faibles même en jachère nue et en tout cas sans commune mesure avec ce qui a été constaté en Casamance.

Par contre, tous les auteurs s'accordent à reconnaître que, l'entraînement des bases est considérable et à pour corollaire une baisse de p^H qui provoque des accidents catastrophiques, (toxicité manganique).

Comme pour d'autres sols, la perte de bases résulte d'une rupture de l'équilibre réalisé par la savane entre drainage et évapotranspiration. Mais, ici, il s'agit de sols fortement désaturés en manganèse et dont le pH initial est bas au départ (5,4 5,2) d'où des phénomènes de toxicité manganique qui stérilisent en quelques années les terres cultivées. Dans de tels sols, le paillage en réduisant l'évaporation favorise beaucoup la lixiviation des bases.

La jachère nue occasionne dans une certaine mesure, les mêmes inconvénients, car l'absence de couvert végétal vivant diminue l'évapotranspiration réelle et augmente le drainage. A tel point qu'une culture ratée nuit autant et souvent plus au sol qu'une culture réussie.

Le tableau suivant portant sur 3 ans donne un exemple de l'évolution du sol dans la vallée du Niari (Congo-Brazzaville) :

	Savane	Parcelles nues	Parcelles cultivées:
	témoin	après 3 ans	en arachide après 3 ans:
	0-15 cm	0-15 cm	0-15 cm
pH	5,0	4,7	4,75
Ca éch. m.é./100 g	1,71	0,89	0,82
Mg éch. " "	0,20	0,04	0,04
K éch. " "	0,22	0,13	0,13
Na éch. " "	0,03	0,03	0,02

Les rendements en arachides sont en corrélation étroite avec les bases échangeables et le pH : de 1120 Kg/Ha en 1ère année, ils passent à 672 Kg/Ha en seconde année et à 593 Kg/Ha en troisième année ; il faut noter que le riz pluvial et la canne à sucre sont moins sensibles à cette évolution du sol.

On pourrait penser qu'un apport de calcaire ou de dolomie broyée devrait être efficace : de fait, un tel amendement de l'ordre de 3 à 7 T à l'hectare donne quelques résultats, mais les augmentations de rendement ne sont pas en rapport avec le coût élevé d'une telle opération.

Par contre, il est utilisé avec un certain succès, semble-t-il, sur canne à sucre (ROUZAUD 1962).

5 - EVOLUTION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

Les questions de porosité et de densité du sol ont été en grande partie déjà traitées dans le chapitre I. On n'y reviendra donc qu'occasionnellement.

La texture des sols cultivés devrait varier relativement peu par rapport aux sols vierges sous l'influence des procédés culturaux proprement dit, sauf naturellement si l'érosion a décapé l'horizon superficiel (on utilise d'ailleurs les différences de texture pour évaluer l'érosion).

C'est en particulier à la démolition de la structure qu'il faut attribuer les cas de variation de structure observés dans les sols cultivés : la destruction des agrégats rend les éléments les plus fins du sol (argile, limon, matières organiques) extrêmement sensibles à l'érosion superficielle, d'où un "ensablement" de la partie superficielle du profil (terres de Barre du Dahomey). Ce phénomène existe déjà le plus souvent sous végétation naturelle mais la mise en culture accroît considérablement son intensité.

De fait, il sera surtout question dans ce paragraphe des modifications apportées à la structure des sols par la mise en culture.

5.1. Sols hydromorphes ou irrigués.

Les structures sont en général mauvaises et l'irrigation les détériore encore.

Les indices I_s d'instabilité structurale de Hénin mesurés par COMBEAU et MONNIER (1960) ont des valeurs de 3,8 à 3,5 dans les rizières du delta central du Niger au Mali ; elles sont encore plus fortes dans les sols à tendance verticale inondés par la crue du fleuve Sénégal : I_s de 4,4 à 6,72 (les chiffres les plus élevés correspondant aux plus longues durées de submersion selon MAYMARD et COMBEAU, 1960).

La mise en valeur sous forme de rizières avec un labour d'enfouissement d'engrais vert a pour effet d'améliorer la perméabilité, la structure restant pratiquement la même.

5.2. Sols ferrugineux tropicaux.

L'indice d'instabilité structural de Hénin s'applique assez mal aux sols très sableux : or, ceux-ci sont fréquents parmi les sols ferrugineux tropicaux.

Bien qu'une méthode spécialement adaptée ait été mise au point (POULAIN 1960), elle semble avoir été insuffisamment utilisée pour fournir des résultats d'ensemble.

Toutefois, on peut considérer que l'horizon superficiel des sols ferrugineux tropicaux, faiblement grumeleux sous végétation naturelle, prend très

rapidement sous l'influence de la culture une structure d'abord particulière sur quelques centimètres superficiels, puis massive immédiatement en-dessous, entraînant ainsi une diminution considérable de la porosité de la partie supérieure du profil.

FAUCK, MOUREAUX et THOMANN (1969) indiquent pour les sols beiges de Casamance (13 à 15 % d'argile en surface) une évolution des indices d'instabilité structurale de Hénin qui passent de 0,60-0,72 sous forêt sèche à 1,25-1,57 après 15 ans de culture. Il en est de même pour la perméabilité : chiffrée à 2,1-2,5 cm/h. sous forêt, elle n'est plus que de 1,3-1,7 cm/h. après 15 ans de culture. (à noter que les sols ferrallitiques, qui, en Casamance, sont étroitement imbriqués dans les ferrugineux tropicaux et ont la même texture, possèdent de meilleures propriétés physiques au départ et se dégradent moins vite s'ils sont cultivés).

Une amélioration nette de la structure a été notée dans les sols cultivés ferrugineux tropicaux très sableux (2 à 4 % d'argile en surface) du centre du Sénégal à la suite de l'enfouissement d'un engrais vert : il s'agit de la transformation de la structure massive en une structure poreuse en "mie de pain" (POULAIN 1965, TOURTE 1965, CHARREAU 1970).

FAUCK (1964 b) note que les racines de riz semblent avoir, en Casamance, un effet améliorateur sur la structure, presque du même ordre que celui de l'engrais vert.

La jachère est le procédé traditionnellement employé pour améliorer la structure des sols cultivés (ainsi que leur fertilité en général) : dans les sols ferrugineux tropicaux sableux (Dior) du centre du Sénégal, GILLIER (1960) constate qu'il faut un minimum de 3 ans de jachère pour obtenir un rendement convenable en arachide, mais cette amélioration ne "tient" pas plus de 2 à 3 ans.

5.3. Sols ferrallitiques.

Les structures originales et les coefficients de perméabilité sont meilleurs sous végétation naturelle que pour les sols ferrugineux tropicaux ; en outre, ils "résistent" mieux à la dégradation due à la culture.

En Casamance, sur des sols ferrallitiques faiblement désaturés sableux (13 % d'argile), on obtient les chiffres suivants (FAUCK, MOUREAUX et THOMANN 1969) que l'on pourra comparer à ceux des sols ferrugineux tropicaux voisins (chiffres indiqués précédemment) :

	Forêt - témoin	Après 15 ans de culture
Is de Hénin	0,49 à 0,56	1,25 à 1,57
Perméabilité cm/h.	2,2 à 2,7	2,4 à 2,6

En République Centrafricaine, sur des sols ferrallitiques faiblement désaturés, sablo-argileux en surface (20 à 25 d'argile). BOYER et COMBEAU (1960) constatent qu'à mesure que l'indice d'instabilité structurale de Hénin prend des valeurs plus élevées dans les champs cultivés, la perméabilité diminue, ce qui peut entraîner, dès la deuxième année de culture, l'apparition d'un ruissellement générateur d'érosion.

Voici quelques valeurs trouvées par ces auteurs :

	Savane témoin	6 ans de jachère imperate + 1 an de culture	4 ans de culture + 1 an de jachère à pueraria javanica
Is de Hénin	0,25	0,35	0,95
Perméabilité cm/h.	15,0	13,9	9,87

La mise en culture entraîne sur ces sols une détérioration de la structure et de la perméabilité ; par contre, si la jachère rétablit assez vite (en 2 ans) la perméabilité, il faut un minimum de 4 à 6 ans de jachère après 3 à 4 ans de culture, pour que l'indice d'instabilité structurale retrouve sa valeur première (sauf un cas, Gounouman, où 2 ans de jachère, venant après 2 ans de culture, rétablissent exactement le niveau primitif de structure et de perméabilité ; il est vrai que dans ce sol l'activité des vers de terre est considérable).

Dans la vallée du Niari (Congo-Brazzaville), sur des sols ferrallitiques très désaturés et argileux, la mise en culture s'accompagne d'une pulvérisation de la structure qui devient poudreuse en surface dès la 2ème année (MARTIN 1963) ; comme les corrélations sont surtout bonnes entre, d'une part, la structure, et d'autre part, la matière organique et les hydroxydes de fer, cet auteur (MARTIN 1964) souhaiterait pouvoir améliorer la stabilité structurale avec un composé organo-ferrique encore à trouver ; à défaut, il pense qu'une jachère utilisée comme pâturage pourrait être efficace. Quoiqu'il en soit, les amendements calciques utilisés jusqu'à ce jour n'ont pratiquement pas d'effet sur la structure de ces sols.

5.4. Vertisols.

Même sous végétation naturelle, ces sols ont des caractéristiques physiques déficientes (structure et perméabilité) et celles-ci se détériorent très rapidement avec la culture.

A Anéé-Mono, au Togo, seule une jachère à calopogonium peut les améliorer (RICHARD 1967) :

Traitements culturaux	Is de Hénin
3 ans de jachère à Calopogonium + 2 ans de culture.	0,69
5 ans de culture continue riz-coton	1,71

LE BUANEC (1970) constate que la mise en culture des sols ferrallitiques sablo-argileux de Bouaké (dans le centre de la Côte d'Ivoire) fait passer l'indice d'instabilité structurale de Hénin de 0,25-0,30 au départ à 0,70-0,80 au bout de 2 à 3 ans ; il considère que ces dernières valeurs sont encore très acceptables car elles ne nuisent en rien à l'enracinement et à la croissance des plantes. Or, ces indices se maintiennent bien pourvu que l'on apporte au sol assez de matières organique ; une rotation culturale comportant 50 % de céréales, l'enfouis-

sement de tous les résidus de récoltes et actuellement une année de jachère à stylosanthes (contre 3 ans de culture) semblent assez satisfaisants à ce point de vue.

5.5. Conclusion.

On sait que les pratiques agricoles détruisent rapidement la structure des sols ; au lieu de chercher à la ramener au niveau initial par une jachère de durée trop longue pour être compatible avec une agriculture même semi-intensive, il devrait être possible de conserver un degré de stabilité structurale, inférieur certes à celui des sols vierges, mais acceptable pour les cultures.

Les moyens d'atteindre cet objectif sont bien loin d'avoir été partout trouvés, mais on peut signaler parmi ceux qui sont mis en oeuvre :

- l'enfouissement d'un engrais vert (effet fugitif),
- l'enfouissement des résidus de récoltes surtout paille de céréales,
- la jachère-prairie pâturée, bien que certains craignent une diminution de la porosité due au piétinement des animaux et préfèrent de ce fait la coupe avec affouragement à l'auge.
- l'introduction d'une dominance de céréales dans la rotation culturale (action des racines).

6 - LA JACHÈRE, L'ENGRAIS VERT ET LE PROBLÈME DE LA CULTURE CONTINUE

Le moment semble venu de tenter de faire le point sur cet important problème de la jachère et de l'engrais vert en liaison avec les tentatives d'intensification des cultures.

6.1. Utilité et inconvénient de la jachère.

Traditionnellement utilisée par l'agriculture africaine, itinérante par définition, la jachère est actuellement le procédé de régénération du sol le plus employé en Afrique francophone.

Reconstituant le stock de matières organiques, elle restaure du même coup les propriétés physiques du sol, restauration à laquelle contribue l'action des racines surtout celles des graminées.

Ces racines vont puiser en profondeur les éléments minéraux entraînés par lessivage et les ramènent en surface : le cas est particulièrement net pour l'Acacia albida au Sénégal (PORTERES 1952 et 1955, CHARREAU et VIDAL 1965).

Il faut y adjoindre des actions encore mal connues comme la solubilisation de certaines bases du sol : ainsi une meilleure alimentation potassique du cotonnier est signalée par BRAUD (1966), en République Centrafricaine, après 2 ans de jachère.

Dans toutes les régions du monde, cet effet favorable de la jachère sur le niveau de fertilité du sol est bien connu et il est inutile d'y insister.

Mais les inconvénients sont nombreux : pour être relativement efficace, une jachère doit durer le double ou le triple du temps des cultures ; LAMOUROUX (1956) considère qu'au Togo 5 ans de jachère sont insuffisants pour palier la baisse de fertilité due à 2 ans de culture. C'est dire qu'il faut une jachère extrêmement longue pour redonner au sol ses propriétés originelles.

Il s'ensuit que la reconstitution de la strate arbustive qui, pour n'être pas totale, n'en entraîne pas moins un lourd travail de défrichage que l'on ne sait pas réaliser économiquement avec des machines ; cette obligation représente un obstacle majeur pour la productivité du paysan africain.

La longueur de la jachère rend inutile les investissements agricoles, qu'il s'agisse des fumures de fond et même d'entretien, ainsi que l'achat de matériel agricole inutilisable dans un terrain rempli de souches. Il y a peut-être plus grave : les vastes étendues de jachère amènent le paysan à considérer la terre comme "res nullius", d'où une dilapidation du capital sol par les feux, le pâturage désordonné, l'absence de prise de conscience des dégâts de l'érosion, l'exploitation minière du sol jusqu'à ce que les rendements deviennent insignifiants, etc...

D'ores et déjà, la pression démographique est telle en certaines régions -pays Mossi en Haute-Volta, pays Sarère au Sénégal, pays Bamikelé au sud-ouest du Cameroun, région Kirdi au nord du Cameroun-, que le temps de jachère se trouve

dangereusement raccourci au grand dam de la productivité des cultures.

Cette pression démographique n'est encore qu'une exception en Afrique francophone mais, elle est sans doute appelée à se généraliser.

6.2. L'utilisation des engrais-vert.

La plante utilisée comme engrais-vert fut au départ envisagée comme un substitut de la jachère ayant la même efficacité ou une efficacité supérieure et une durée bien inférieure (un an en général).

D'innombrables essais ont comparé l'action de l'engrais-vert et de la jachère sur les rendements des plantes cultivées.

On peut classer les auteurs qui ont écrit sur ce sujet en 2 groupes :

- ceux qui n'accordent aucune supériorité à l'engrais-vert (et souvent même constatent une infériorité) par rapport à la jachère naturelle : BOUFFIL et al. (1950) ; JAUBERT (1952) ; THEVENIN et FAUCHE (1954) ; GILLIER (1960) ; SILVESTRE (1961) ; BONFILS (1963) ; ROOSE (1967), tous au Sénégal. ROCHE et VELY (1961 et 1962) confirment que l'engrais-vert seul est incapable de restaurer la fertilité des principaux types de sol de Madagascar et en particulier d'assurer une meilleure alimentation en phosphore, élément dont ces sols manquent peut-être le plus.
- ceux qui constatent des effets favorables sur les cultures à la suite d'un enfouissement d'engrais-vert : JULIA (1953) au Niari ; DOMMERGUES (1956) à propos de la microflore des sols du Sénégal ; PORTERES et FAUCK (1961 et 1963) ; CHARREAU (1963) ; TOURTE (1965) ; TOURTE et al. (1967) ; POULAIN (1965) ; CHARREAU (1970).

Ainsi qu'on peut le constater, le deuxième groupe se situe dans l'ensemble plus près de nous que le premier. Il est vrai qu'avec le temps les idées sur le rôle de l'engrais-vert se sont modifiées.

On a constaté en particulier que l'enfouissement d'un mil engrais-vert bien qu'apportant au sol 50 T de matières sèches à l'hectare n'enrichissait pas le sol en matière organique par suite d'une décomposition extrêmement rapide (MONNIER 1965) et que, s'il y avait effet favorable, celui-ci concernait surtout la

structure et la porosité du sol et que de toute façon cet effet favorable était de courte durée (un cycle cultural).

En conséquence, il ne fallait donc pas rechercher une action globale comme celle d'une jachère de longue durée.

Mais, surtout, on s'est habitué à considérer l'engrais-vert comme un des éléments de l'intensification des cultures au même titre que le labour, l'apport des engrais minéraux, l'enfouissement des résidus de récoltes, etc... toutes opérations dont il fait partie intégrante et dont il ne peut se dissocier.

En conclusion, on peut dire que l'engrais-vert a donné d'excellents résultats en particulier pour améliorer la porosité et la structure ; ces améliorations sont fugaces mais fort utiles.

D'autre part, l'engrais-vert, comme toute technique élaborée, ne peut se dissocier des autres moyens mis en oeuvre par l'agriculture moderne (labour, engrais, etc...).

Enfin, il faut constater que pratiquement aucune expérience n'a été faite sur les plantes fourragères pâturées que l'on peut considérer comme un engrais-vert de durée plus longue.

6.3. Les rotations culturales.

L'agriculture africaine se caractérise non seulement par son caractère itinérant mais par une quasi-monoculture de fait : traditionnellement le paysan ne cultivait qu'une plante alimentaire (rarement 2) sur la même sole, plante qui suffisait à une alimentation particulièrement monotone.

L'introduction par les colonisateurs de cultures industrielles (arachides, coton) a modifié un peu cet aspect des choses, mais on aboutit de toute façon à une rotation culturale squelettique, arachide-mil, coton-manioc, riz-coton, etc... quand ces plantes ne sont pas cultivées sur deux soles différentes. (La présence de cultures associées ne modifie pas les données du problème).

Or, on sait tout le parti que l'agriculture des pays tempérés a tiré des successions de cultures où les graminiées et les plantes fourragères occupent la plus grande place. (On peut noter que l'action bénéfique des racines de céréales sur la structure du sol a été signalée en Afrique tropicale francophone par de

nombreux auteurs, FAUCK (1954 b), CHARREAU (1963) entre autres).

L'enfouissement des racines, tiges et pailles de céréales donne d'excellents résultats et permet de reconstituer le stock d'humus du sol (CHARREAU et FAUCK 1969 ; LE BUANEC 1970), à condition toutefois que les cultures soient de belle venue ; ainsi la restitution aux sols des déchets de récoltes d'un riz à 40 qx/Ha permet de compenser et au-delà, la minéralisation de la matière organique qui s'est produit pendant la culture ; il est évident qu'avec un riz à 12 qx/Ha, une telle compensation est impossible (LE BUANEC 1970).

Naturellement, il faudrait introduire dans la rotation une majorité de céréales dont les racines, pailles et tiges partiellement lignifiées ont un coefficient d'humification de 15 % alors que ce même coefficient est proche de zéro pour les engrais-verts et les parties vertes des plantes (MONNIER 1965).

Il y a donc là un aspect très encourageant dans les perspectives d'intensification agricole en Afrique tropicale, à condition de pouvoir résoudre le problème de l'enfouissement de ces résidus de récolte actuellement hors de portée des moyens de l'agriculteur africain.

6.4. La culture continue est-elle possible ?

Pratiquée parfois par les africains jusqu'à épuisement complet du sol, la culture continue (avec ou sans engrais-vert) est envisagée par les stations de recherche comme une opération qui puisse permettre de cultiver un sol indéfiniment, et ceci en rendant productives toutes les soies.

Actuellement, un certain nombre de chercheurs en arrivent à penser qu'un apport d'engrais et d'amendements minéraux est capable de maintenir le potentiel initial de fertilité du sol en compensant par ces apports la lixiviation des bases et les exportations par les récoltes (GILLIER 1960 ; TOURTE et al. 1964 ; RICHARD 1967 a et b).

Quant au grave problème de la baisse du taux de matière organique à la suite de la mise en culture, il semble résolu actuellement dans le centre de la Côte d'Ivoire, par l'enfouissement des racines, tiges et pailles des céréales (LE BUANEC 1970). Quoiqu'il en soit, la dégradation de l'humus ne paraît pas avoir

dans cette région un aspect inquiétant, car les teneurs en matière organique se stabilisent dans les sols cultivés à une valeur acceptable (RICHARD 1967).

Les opinions sont plus nuancées en Casamance où CHARREAU et FAUCON (1969) constatent que l'enfouissement des seules racines de riz, de maïs et de sorgho est insuffisant pour compenser la minéralisation de l'humus pendant un cycle cultural à base d'arachide. Ce qui explique que l'un des importants problèmes à résoudre dans cette optique est celui de l'obtention de variétés de mil et de sorgho nettement plus courtes et moins volumineuses que les variétés actuelles dont les tiges fort encombrantes (4 m. de hauteur) doivent être brûlées après la récolte.

Quant à la jachère, il devrait être possible de la supprimer, tout au moins de la remplacer par une prairie fauchée ou peut-être pâturée si le piétinement des animaux ne détruit pas la porosité du sol.

Malgré tout il semble que la jachère restera indispensable dans un certain nombre de cas :

- pour les vertisols où elle s'est montrée seule capable de restaurer la structure,
- pour les sols dégradés par l'érosion,
- pour les sols abimés par de mauvaises pratiques culturales ou une succession de cultures ratées,
- pour apporter économiquement aux cultures certains éléments minéraux. comme la potasse (BRAUD 1962), présents dans le sol mais sous une forme non assimilable.

7 - CONCLUSION

=====

Un gros travail a été fait en Afrique tropicale francophone pour suivre l'évolution des sols sous culture.

Sans contester les mérites de la jachère qui reste et sans doute restera longtemps un élément indispensable de restauration de la fertilité des sols au moins

dans certains cas, les chercheurs se sont orientés vers le remplacement de la jachère longue par une sole d'engrais-vert ou vers sa suppression.

A côté d'échecs retentissants comme dans la vallée du Niari (Congo-Brazzaville), de demi-succès comme en Casamance, ces expériences semblent prometteuses sur les sols sableux du Sénégal, en Côte d'Ivoire, en République Centrafricaine, etc...

Quoiqu'il en soit, les études entreprises ont permis de préciser le sens et l'importance de beaucoup de phénomènes qui se produisent dans les terres cultivées : érosion, évolution des matières organiques, de la structure et des bases échangeables, rôle de la jachère, de l'engrais-vert, de l'enfouissement des résidus de récolte, importance de soles céréalières, etc...

Tout n'est pas résolu tant s'en faut, mais, la somme des connaissances acquises doit permettre un nouveau pas en avant vers l'intensification de l'agriculture africaine.

8 - ANNEXE : PLANTATIONS PERENNES
=====

Cas particulier de l'évolution des sols dans les Plantations pérennes : (caféières, cacaoyères, bananeraies, plantation d'hévea ou de palmier à huile).

Les plantations pérennes sont établies habituellement sur des défriches forestières et elles reconstituent somme toute le micro-climat de la forêt qui les a précédées. Le cas est particulièrement net pour les cacaoyères.

Même lorsqu'elles sont installées en savane, elles le sont toujours sous des climats assez humides pour que la végétation naturelle potentielle soit la savane : elles restaurent donc, au moins partiellement, un "climax" que l'homme avait détruit.

Le fait de planter des arbustes (caféiers) ou des arbres (cacaoyers, héveas, palmier à huile), d'installer et d'entretenir une plante de couverture qui couvre complètement le sol (Pueraria javanica, Leucoena glauca, Stylosanthes gracilis, etc...) lorsque l'ombrage de la plantation est insuffisant, tout ceci restaure l'ambiance forestière et limite au maximum le changement de pédo-climat.

8.1. Evolution des sols sous culture.

Après défrichement qu'il y ait brulis des abattis de forêt ou andainage des matières végétales, la plantation d'arbres ou d'arbustes et l'installation d'une plante de couverture limite au maximum la perte de matières organiques ; au bout de 2 ans, même après brulis le sol a retrouvé le taux de carbone organique qu'il possédait sous la forêt (FORESTIER, 1959).

Il y a tout de même une certaine perte de la fertilité due aux exportations des récoltes ainsi que le constate DEUSS (1969) sur une plantation de cafés, âgée de 12 ans en République Centrafricaine, qui a produit 68 Tonnes de café à l'hectare en 12 ans.

	Après brulis		Après andainage	
	1956	1968	1956	1968
pH	8,0	4,5	5,7	4,5
Ca éch. m.é./100 g	9,50	2,51	4,40	2,72
Mg éch. m.é./100 g	1,18	0,57	0,73	0,42
K	0,83	0,14	0,41	0,13
N ‰	1,83	0,63	2,01	0,61
C/N	8,2	2,6	8,9	22,6

Ceci naturellement pour une plantation conduite sans engrais.

8.2. Ces plantations reçoivent normalement des engrais minéraux et des amendements.

Les stations de recherche ont proposé aux planteurs des formules d'engrais adaptées à chaque région (LOUE 1957 et 1961 ; MOULINIER 1962 ; FORESTIER 1964 et 1966 ; BORGET et al. 1963 ; BENAC 1965 ; OCHS 1968 b).

Dans le cas général ces formules sont utilisées par les praticiens : d'abord utilisées uniquement par les agriculteurs européens, elles pénètrent maintenant en milieu africain (cacaoyères de Côte d'Ivoire).

Les plantations de caféiers de la Côte d'Ivoire représentent une exception mais traitées en culture extensive à faible densité et à très faible rendement (200 à 300 Kg/Ha de café marchand) leur incidence sur la fertilité du sol est minime.

On assiste donc à une compensation des exportations par les engrais.

8.3. Dans les bananeraies et les palmeraies d'Elaeis guinensis, il y a même relèvement de la fertilité.

Le cas est particulièrement net pour les bananeraies de Côte d'Ivoire : établies dans des tourbières pratiquement infertiles, fertilisées par des amendements calco-magnésiens et des engrais à fortes doses, ces plantations hautement productives possèdent maintenant des sols dont les caractéristiques physiques et chimiques se sont grandement améliorées depuis le jour où elles ont été défrichées. (CHAMPION et PY 1967, MARTIN-PREVEL 1969, GODEFRDY et al. 1969).

Cette amélioration est peut-être moins spectaculaire pour les palmeraies de palmier à huile : mais elle n'en est pas moins réelle : l'addition de potasse au sol a permis en Côte d'Ivoire et au Cameroun d'augmenter considérablement la production.

Mieux : grâce à des engrais minéraux (Potasse en particulier), certaines savanes côtières complètement infertiles de basse Côte d'Ivoire se sont couvertes de palmeraies à forte productivité (BOYE 1962) et de plantations d'héveas en plein essor.

8.4. Conclusion.

On peut donc dès maintenant considérer ces plantations comme une réussite technique pratiquement totale. Non seulement le sol est valorisé par des cultures à haute rentabilité, mais il est à l'abri de l'érosion et il peut conserver et même augmenter son potentiel de fertilité grâce à des techniques culturales actuellement bien au point et à l'emploi parfaitement défini d'engrais minéraux bien que ceux-ci soient, actuellement encore, trop peu répandus en milieu africain.

Une telle réussite des techniques modernes pour les plantations pérennes doit donner confiance en ce qui concerne le travail à poursuivre pour les cultures annuelles.

- B I B L I O G R A P H I E -

- ABRUNA(F.) VINCENTTE-CHANDLER J. 1963 - Effect of six sources of nitrogen on yields, soil acidity and leaf composition of coffee. Journal of Agriculture, Puerto-Rico University 1963, 47,I - 41-46.
- AHAZA(L.R.), GAUTMAN(C.P.) 1961 - Response of hybrid Maize to zinc fertilization. Current Science (Bangalore) 1961, 30,12 473-474.
- ANDERSON(A.J.) 1956 - Molybden and symbiotic nitrogen fixation. Australian counc. Sc. Ind. Research. Bull. 1956,198 7-24
- ANGLADETTE(A.), CHABROLIN R. 1962 - Compte rendu de la 9^e session du groupe de travail sur la production et la protection du riz. Agronomie tropicale 1962, XVII, I, 84.
- ANGLADETTE(A.), MARIE P., 1964 - Compte rendu de la neuvième session du groupe de travail des sols, des engrais et des eaux de la Commission Internationale du riz de l'organisation des Etats Unis pour l'alimentation et l'Agriculture . Manille 4-14 Mars 1964. Agronomie Tropicale 1964, XIX,4,344-36.
- ANONYME 1965 - Deuxième producteur d'arachides dans le Monde, le Sénégal fait le point. Oléagineux 1965, 20,5 - 283-286 .
- ARNAUDIE(C.), CRAVERI(R.) 1964 - Finzioni microbiche nel metabolismo dello Zolfo nel terrino. 5em. Symposium Agrichima - Le Soufre en Agriculture. Palerme-Catane, 16-21 Mars 1964 .
- ASHRIF(M.I.), EVELYN(S.H.), THORNTON I. 1962 - L'arachide en Gambie. Oléagineux, 1962, 17,7,611.
- ASHRIF(M.I.), 1963 - Effet du calcium sur l'arachide. Oléagineux, 1963, 18,II, 680-683.
- AUBERT(G.), MOULINIER H., 1954 - Observations sur quelques caractères des sols de cacaoyères en Côte d'Ivoire. Agronomie Tropicale 1954, IX,4 - 428-438.
- 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. 1967,II, 1263-1264-1265.
- AUDRY(P.) 1965 - Premiers résultats partiels d'une étude d'évolution comparée des sols au Tchad. Résultats agronomiques relatifs à la campagne de coton 1964 sur les sols rouges faiblement ferrallitiques de Déli. Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility. Khartoum 1965, 96-112.
- AUBERT(G.) 1965 - Classification des sols. Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes des sols utilisés par la section de pédologie de l'ORSTOM. Cahiers ORSTOM, série pédologie 1965 III 3 , pages 269-288 .

- AUBERT(G.) 1965. La classification pédologique utilisée en France. Pédologie 3^o Symposium international classification des sols 1965 pages 25-56
- AUBREVILLE(A.) 1949 - Climat, forêt et désertification de l'Afrique tropicale - 351 pages - Ddit. Série d'éditions géographiques maritimes et coloniales Paris. 1949.
- BACHELIER(G.) 1957 - Etude pédologique de la zone du volcanisme récent au sud-est de N'Gaoundéré. Agronomie Tropicale 1957, XII,5 552-575.
- BACHELIER(G.) 1960 - Détermination biologique du pouvoir nutritif d'un sol par développement conditionné des microorganismes et dosage de l'oxygène qu'ils absorbent. Agronomie Tropicale 1960, XV, 5, 525-524.
- BACHELIER(G.) 1963 - Sur le potentiel d'activité biologique de sols ferrallitiques différemment cultivés. Cahiers ORSTOM, Série pédologie 1963,4,51-64.
- BACHELIER(G.) 1966 - Les sucres dans le sol et leur dosage global. Cahiers de l'ORSTOM, 1966 Pédologie, IV,I,9-22.
- BACHY(A.) 1968 - Principaux résultats acquis par l'IRHO sur la fertilisation du palmier à huile. Oléagineux 1968,23,I, 9-14.
- BAKER(E.F.I.) 1965 - Intervention orale à la 1ère conférence sur le Sorgho, le Millet et le Maïs. (projet conjoint OAU/STRC N° 26) Zaria, Northern Nigeria -3-9 Oct. 1965. "IN" Sols Africains 1966,XI,Iet 2, 248 .
- BELEY(J.), CHEZEAU(R.) 1954 - Caractéristiques physiques et chimiques des sols à cacaoyers de Côte d'Ivoire. Agronomie Tropicale 1954,IX,4, 439-451.
- BENAC(R.) 1965 - Etude des besoins en éléments majeurs du caféier Arabica en pays Bamoun, Cameroun. Café Cacao Thé (Paris), 1965,IX,I, 3-23.
- BENAC(R.) 1967 - Etude des besoins en éléments majeurs du caféier Arabica en pays Bamoun. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967,i. 992-1006.
- 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 1969,XIII,2 - 116-130.
- BERGER(J.M.) 1964 - Profils culturaux dans le centre de la Côte d'Ivoire Cahiers ORSTOM, 1964, série Pédologie I, 4I-69.
- BERLIER(Y.), DABIN(B.), LENEUF(N.) 1956 - Comparaison physique, chimique et microbiologique entre les sols de forêt et de savane sur les sables tertiaires de la Basse Côte d'Ivoire. 6ème Congrès Intern. Sc. du Sol, Paris 1956,V,81, 499-502.

- BERLIER(Y.) 1958 - La nodulation chez les légumineuses de Basse Côte d'Ivoire. Rapport interne ORSTOM 1958, inedit 39 p.
- BERTRAND(R.) 1967 - Etude de l'érosion hydrique et de la conservation des eaux et du sol en pays Baoulé (Côte d'Ivoire). Colloque sur la fertilité des sols tropicaux . Tananarive 19-25 Nov. 1967, II 1281-1925.
- BEZOT(P.) 1965 - La zone arachidière au Tchad. Etude d'ensemble, recherche d'un système valable de rotation culturale. Agronomie tropicale 1965, XX, I, 31-48 .
- BEZOT(P.) 1966 - Les recherches rizicoles au Tchad. Agronomie Tropicale 1966, XXI, I, 70-92.
- BIRCH(H.F) 1958 - The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and soil, 1959, 10 9-31.
- BIRIE-HABAS 1965a- Le Stillozobium comme espèce améliorante de la jachère. Sols Africains 1965, X, 2-3, 391-394.
- BIRIE-HABAS 1965 b - Comportement d'espèces fourragères introduites en Casamance. Sols Africains 1965, X 2, 3, 429-433.
- BIRIE HABAS (J.) 1966 - Les recherches rizicoles en Casamance. Situation en 1965. Agronomie Tropicale 1966, XXI, I 38-46.
- BIRIE HABAS (J.) 1968 - Comportement d'espèces fourragères en bas fonds de Moyenne Casamance - Sénégal. Agronomie Tropicale 1968, XXIII, 6-7. 974-981.
- 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. 1967, I, 1019-1023.
- BIROT(Y.), GALABERT(J.) 1967 - L'amélioration des rendements en agriculture par aménagements antierosifs et techniques culturales visant à la conservation de l'eau et du sol dans la région de l'Adder Douchi Maggia, Rep. du Niger - Station d'Allokoto. Premières observations 1966. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, II, 1316-1331.
- BLANCHET(R.)- 1958 - Energie d'absorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes . Ann. Agr. 1958 N° 1 5-53, N° 2 125-149, N° 3 267-307.
- BLONDEL (D.) - 1965 - Premiers éléments sur l'influence de la densité apparente du sol sur la croissance racinaire de l'arachide et du sorgho, ses conséquences sur les rendements. Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility - Khartoum 1965, 173-181 .
- BLONDEL (D.) - 1967 a - Premiers résultats sur la dynamique de l'azote minéral de 2 sols du Sénégal. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967. 430-499.

- BLONDEL (D.) - 1967 b - Importance réelle des pertes par volatilisation de l'ammoniaque en sol sableux (Dior). Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967 500-508.
- BLONDEL (D.) 6 1970 a - Relation entre " nanisme jaune " de l'arachide en sol sableux (Dior) et le pH; définition d'un seuil pour l'activité du Rhizobium. A paraître dans l'Agronomie Tropicale 1970.
- BLONDEL (D.) - 1970 b - Communication personnelle .
- BLONDEL(D.) - POULAIN(J.F.)- 1970 - Premiers résultats sur la réponse du Maïs aux éléments principaux de la fumure minérale en Moyenne Casamance. Proposition de fumure. 3ème Séminaire sur l'Agriculture en Afrique de l'ouest, organisé par la Fondation Ford, IITA et IRAT. Ibadan 27Avril 1er Mai 1970.
- BOCKELEEE-MORVAN (A) - 1961 - Recherches de l'IRHO sur l'utilisation des phosphates du Sénégal en fumure de fond pour l'arachide. Oléagineux 1961,16,II - 685-691.
- BOCKELEEE-MORVAN (A.) - 1964 - Etude de la carence potassique de l'arachide au Sénégal. Oléagineux 1964 - 19,10 - 603 - 609.
- BOCKELEEE-MORVAN (A.) - 1966 - Efficacité des diverses formes d'apport des éléments minéraux sur l'arachide. Oléagineux 1966,21,3 163-166.
- BOCKELEEE-MORVAN (A.) 1968 a - Rentabilité de la fumure minérale sur Arachide au Sénégal . Colloque d'Abidjan 1968, II,260-271.
- BOCKELEEE-MORVAN (A.). 1968 b - Evolution des rendements de l'arachide et du sorgho sous l'influence des jachères ou de l'engrais vert. Colloque d'Abidjan 1968, II, 272-282.
- BOCKELEEE-MORVAN (A.) 1968 c - Résultats des recherches IRHO sur l'arachide en Haute Volta. Colloque d'Abidjan 1968,II, 283-296.
- BOCQUIER (G.), CLAISSE (G.) - 1963 - Reconnaissance pédologique dans les vallées de la Gambie et de la Kelountou. République du Sénégal. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie 1963,4 5-31.
- BOISSEZON (P.) 1961 - Contribution à l'étude de la microflore de quelques sols typiques du Congo. Rapport inédit ORSTOM 1961.
- BONFILS(P.) , FAURE (J.) - 1955 - Etude comparative des sols du CRA de Bambey. Bull. Agro. N° 16 (Annales CRA Bambey 1955). P. 5-24.
- BONFILS (P.), FAURE(J.) 1961 - Etude des sols du Bao Bolon . Agronomie Tropicale 1961,XVI,2, 127-147.
- BONFILS (P.) 1963 - Evolution de la matière organique dans deux sols du Sénégal. Agronomie Tropicale 1963, XVIII, 1254-1279.

- BONO M., MARCHAIS (L.) - 1966 - Le point des recherches rizicoles au Mali. *Agronomie Tropicale* 1966, XXI,4, 520-557.
- BONNIER(CH). 1957 - Symbiose Rhizobium légumineuses en région équatoriale. Pub. INEAC., série scientifique, N° 72, 1957.
- BONNIER (CH.) 1960 - Symbiose Rhizolium légumineuses : aspects particuliers aux régions tropicales. *Annales Inst. Pasteur* 1960, 98, 537-556.
- BONZON (B.), TALINEAU - 1970 - Communication personnelle .
- BOQUEL (G.), KAUFFMANN (J.), TOUSSAINT (P.) 1953 - Recherche de l'influence du climat et de la végétation sur la flore microbienne des pays tropicaux . *Agronomie Tropicale* 1953, VIII,5, 476-481 .
- BOQUEL (G.), - 1955 - Sur les techniques de mesure du pouvoir ammonificateur des terres. Etude faite sur des terres sous climat tropical. *Agronomie Tropicale* 1955-X,5, 616-630.
- BOUCHARD, TREVER de CASABIANCA, ANDRIAMIHAINGO, ROCHE 1964. Etude pédologique de la plaine de Mahabo (Préfecture de Morondava) *Agronomie Tropicale* 1964, XIX, 3, 227-252.
- BOUCHY (F.) - 1970 - Communication personnelle .
- BOUFFIL (F.), SAUGER (L.) - 1944 - Quinze ans d'engrais et d'amendement sur l'arachide. 86 p. dactylographiées .
- BOUFFIL (F.), TOURTE (R.), GAUDEFROY-DEMON-BYNES (P.), PELISSIER (J.) - 1950 - Les terres à arachides du Sénégal. Amélioration des rendements par l'utilisation des engrais verts. *Bull. Agro. N° 6 (Annales CRA Bambey 1950)* 37-40 .
- BOULET (R.), LEPRUN (J.C.) - 1959 - Etude pédologique de la Haute Volta région Est. Document ronéoté ORSTOM. DAKAR 1969.
- BOULET (R.), LEPRUN (J.C.) - 1970 - Communication personnelle .
- BOUYER (S.), COLLOT (L.) - 1950 - Oligo éléments et arachide . *Bull. Agro. N° 7 (Annales CRA Bambey 1951)* - 77-78
- BOUYER (S.), 1951 - Microbiologie des sols à arachide - Vue d'ensemble *Bull. Agro. N° 7 (Annales CRA Bambey)* 1951 - 162-166.
- BOUYER (S.), 1952 - Microbiologie des sols à Arachide du Sénégal vue d'ensemble. *Bull. Agro. STAT, 1952, 162-166 .*
- BOUYER (S.), 1954 a - Composition et fertilité des terres à arachide en Afrique occidentale. *Ministère France Outre-Mer Bull. Agronomique* 1954, 12, 68-74.
- BOUYER (S.), 1954 b - Note sur la microbiologie des sols à arachide du Sénégal. *Conf. Arachide-Mil (5-13 sept. 1954). Bull. Agro. N° 12 - 64-67 (Annales CRA Bambey 1954) .*

- BOUYER (S.) - 1959 - Etude de l'évolution des sols dans un secteur de modernisation agricole au Sénégal. 3ème conf. Interafricaine des Sols, Dalaba, Nov. 1959.
- BOUYER(S.) 1963 - Considérations d'ordre pratique sur l'étude de la fertilité des sols tropicaux . Agronomie Tropicale 1963, XVIII, 9,833-938.
- BOUYER(S.), 1965 - L'expérimentation en matière de fertilisation. Agronomie Tropicale 1965,XX,10, 1025-1028.
- BOUYER (S.) 1967 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. 1967, 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. 1967,I 461.
- BOUYER (S.) 1968 - Engrais et politique de l'engrais. Colloque d'Abidjan 1968,II 50-60
- BOUYER (S.) 1969 - Compte rendu d'une mission effectuée au Dahomey 10 Février-1er Mars 1968. Agronomie Tropicale 1969,9 816-826.
- BOUYER(S.), MARA (M.), DIAGNE (M.) 1954 - L'évolution du sol dans un secteur de modernisation agricole du Sénégal - Cas de Boulel Premières observations. Bull. Agro.N° 13 (Annales CRA Bambey 1954) 141-154.
- BOUYER (S.), MARA (M.), DIAGNE (M.), Nouvelle orientation des recherches sur l'utilisation des phosphates au Sénégal. Bull. Agro. N° 15 (Annales de Bambey) 1955, 92- 98.
- BOUYER (S.), DABIN (B.) - 1963 - Etudes pédologiques du delta central du Niger. Agronomie Tropicale, 1963, XVIII,12,1300-1306.
- BOUYER (S.), DAMOUR (M.) - 1964 - Les formes du phosphore dans quelques types de sols tropicaux . VIIIem. Congrès International de la Science du Sol, Bucarest 1964 .
- 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. 1962, C. 3-1.
- BOYER(J.) - 1956 - Quelques critères dans le choix d'un sol à Sisal en Oubangui-Chari (Afrique Equatoriale Française). 6em. Congrès International de la Science du Sol Paris 1956, IV,51 347-351 .
- BOYER (J.), COMBEAU (A.) - 1960 - Etude de la stabilité structurale de quelques sols ferrallitiques de la République Centrafricaine. Sols Africains 1960,V,I,6,42.

- BOYER (J.) - 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) 1964, VIII, I 22-31.
- BOYER (J.) - 1965 - Nature de la couverture du sol et influence sur le bilan hydrique d'une cocoteraie. Oléagineux 1965, 20, 4, 231-238.
- 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 (Paris) 1963, VII, I - 22-32.
- BRAUD (M.) - 1962 - La fertilisation minérale du cotonnier en République Centrafricaine. Coton et Fibres Tropicales, 1962, XVII I II-22.
- BRAUD (M.) - 1964 - Le soufre dans la fertilisation minérale du cotonnier. Coton et Fibres Tropicales 1964, XIX, 3 - 357-362.
- BRAUD (M.) - 1966 - La fertilisation du cotonnier en Afrique Tropicale et à Madagascar. Coton et Fibres Tropicales 1966, 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. 1967, 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. 1967, I 755-767.
- BRAUD (M.) - 1967- c - L'expérimentation sur les formes de phosphate en culture cotonnière. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I 862-873.
- BRAUD (M.), RICHEZ (F.) - 1963 - Sur des pulvérisations foliaires d'urée en culture cotonnière. Coton et Fibres Tropicales 1963, XVIII, 3 - 281-283.
- BRAUD (M.), FRITZ (A.) MEGIE (CH), QUILLON (P.J.) - 1969 - Sur la déficience en bore du cotonnier. Observations préliminaires. Coton et Fibres Tropicales 1969, XXIV, 465-467.
- BROCKINGTON (N.R.), STOBBS (T.H.), NEWHOUSE (P.W.), WADSWORTH (G.A.) 1965 - The effects of leys on soil fertility in the annual cropping areas in Uganda. Sols Africains 1967, X, 2, 3 - 473-481.
- 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). 2ème Conf. Interafricaine des Sols. Léopoldville 1954, II - 1223-1231.

- BRUGIERE (J.M.) - 1956 - Etude des sols à caféiers du 2ème secteur du Moyen Congo - Brazzaville 1956 .
- BRUNIN (C.) - 1968 - Phosphore et Cocoteraie adulte. Oleagineux 1962 23,5 309-307.
- BUSCH (J.) - 1958 - Etude sur la nutrition minérale du caféier Robusta dans le Centre et l'Ouest Oubangui. Agronomie Tropicale 1957, XIII,6, 732-760.
- CALVET (H.) - 1968 - Carences minérales. Colloque d'Abidjan 1968,II, 176-182
- CASHMORE (W.H.), HAWKINS(S.C.) 1957 - Tillage equipment and soil conservation. J. Inst. Ag. Eng., 1957, 13-20.
- CASTAGNOL (L.) 1950 - Problèmes des engrais minéraux dans les terres hautes tropicales. Agronomie Tropicale 1950,3,4, 184-186.
- CATHERINET (M.) 1965 - Note sur la culture du Macabo et du Taro au Cameroun. Agronomie Tropicale 1965, XX,8, 717-724.
- CHABROLIN(R.)1966 - Les recherches agronomiques confiées à l'IRAT en matière de riziculture tropicale. Agronomie Tropicale 1966, XXI,I, 7-18.
- CHABROLIN (R.) 1967 - Utilisation des engrais en rizière à Madagascar. Agronomie Tropicale 1967 XXII,4, 387-405.
- CHAMINADE (R.) 1965 a - Recherches sur la fertilité et la fertilisation des sols tropicaux. Principes de base et techniques. Agronomie Tropicale 1965, XX, 10, 1014-1017.
- CHAMINADE (R.) 1965 b - Bilan de trois années d'expérimentation en petits vases de végétation. Mise au point technique. Résultats. Agronomie Tropicale 1965, XX,10, 1801-1162.
- CHAMINADE (R.) 1968 - L'élévation du niveau de fertilité des sols tropicaux, condition de l'établissement de systèmes de culture intensifs. Colloque d'Abidjan 1968, t. II, 18-24.
- CHAMPION (J.) 1960 - Quelques indications sur les besoins en eau du bananier nain. Fruits 1966, 15,9 387-400
- CHAMPION (J.) 1963 - Le bananier. Maisonneuve et Larose edt.,Paris 1963 - 263 pages .
- CHAMPION (J.), DUGAIN (F.), DOMMERGUES (Y.) MAIGNEN (R.) 1958 Les sols de bananeraies et leur amélioration en Guinée Française. Fruits 1958,13,9-10, 415-462.
- CHAMPION(C.), PY (C.) 1968 - Particularités de la fertilisation et de la nutrition minérale pour certaines cultures fruitières tropicales (Bananes et Ananas) et conséquence sur les méthodes de recherches. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux.Tananarive 19-25 Nov. 1958,I, 596-598.

- CHANG(S.C.), JACKSON(M.L.)1957 - Fractionation of soil phosphorus.
Soil Sc. 1957, 84,2,-133-134
- CHANG et CHU - 1961 - The fate of soluble phosphate applied to soils.
Journal of Soil Science Oxford, Vol. 12, N° 2, Sept 1961,
286-293.
- CHARPENTIER(J.M.), MARTIN-PREVEL (P.) - 1965 - Carences atténuées
ou temporaires en éléments majeurs. Carences en oligo-éléments
chez le bananier. Fruits 1965, 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.1967, I, 286-293.
- CHARREAU(C.)1961 a - Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal.
Agronomie Tropicale 1961,XVI,5 504-561.
- CHARREAU (C.) 1961 b - A propos des problèmes de l'irrigation au
Sénégal . IRAT. CRA. Bambey, inédit .
- CHARREAU (C.) 1963 a - Dynamique de l'eau dans 2 sols du Sénégal.
Agronomie Tropicale, 1963.
- CHARREAU (C.) 1963 b - Compte rendu de tournée au Sénégal Oriental
en Casamance (6-17 Août 1963). Compte rendu de la réunion
hebdomadaire du 26 Août, document IRAT inédit 51 p.
- CHARREAU (C.) 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. 1967, II, 1263.
- CHARREAU (C.) 1969 - Influence des techniques culturales sur le
développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance
Agronomie Tropicale 1969,9,836-842.
- CHARREAU (C.) - 1970 - Note synthétique sur le travail du sol et son
incidence agronomique dans la zone tropicale sèche de l'Ouest
Africain . Document provisoire, IRAT 1970, inédit.
- CHARREAU (C.) , VIDAL (P.) 1962 - Facteurs pédologiques influant sur
la croissance et la nutrition des doliques. Agronomie
Tropicale 1962, XVII,9,765-775.
- CHARREAU (C.), POULAIN (J.F.) 1962 -La fertilisation des mils et
sorghos. Colloque CCTA/FAO sur les céréales des zones
de savane - Dakar 29 Août-4 sept. 1962. "IN" Agronomie
Tropicale 1963, XVIII,I 53-64.
- CHARREAU (C.), POULAIN (J.F.) 1964 - La fertilisation des Mils et
Sorghos. Sols Africains 1964, IX, 2 161- 175.
- CHARREAU (C.), VIDAL (P.), 1965 - Influence de l'Acacia Albida (Del)
sur le sol.Nutrition minérale et rendements des mils penni-
setum au Sénégal. Agronomie Tropicale 1965,XX,6-7, 600-626.

- CHARREAU (C.), FAUCK (R.) 1969 - Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa (Casamance). Document interne IRAT-ORSTOM. 1969, inédit, à paraître dans Agronomie Tropicale 1970, XXV,2.
- CHARTER(C.F.)- 1957 - The aims and objects of Tropical soil surveys. Soils and Fert. 1957,20 127-128.
- CHAUVEL (A.), MONNIER (A.) 1967 - Sur la signification générale de l'analyse granulométrique en pédologie - Examen des problèmes posés par la caractérisation de la structure de certains sols tropicaux . Académie des Sciences t. 124 , 1969-70-1967.
- CHAUVEL (A.) - Communication personnelle.
- CHENERY (E.M.) - 1954 - Minor elements in Uganda soils. 2 em. Conf. Interafricaine des sols, Léopoldville, 1954, Comm. N° 91, II p. 1157-63.
- CHEVERRY (C.) 1966 - Etude préliminaire des processus d'hydromorphie et d'halomorphie dans les sols des Polders de la région de Bol (rive du Lac Tchad). Cahiers ORSTOM, Pédologie, 1966, IV,3 63-96
- CHEVERRY (C) 1967 - Note sur la fertilité des sols de Polder de Bol après dix années de mise en culture . Cahiers ORSTOM. Pédologie 1967,V,2, 117-135.
- CHINKABA(P.M.) 1966 - Problems of expanding Maize production in Nigeria. Sols Africains 1966,XI,I-2, 201-212.
- CHOBART de LAUVE - 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. 1967,II, 1265.
- COINTEPAS (J.P.) - 1956 - Premiers résultats des mesures d'érosion en Moyenne Casamance (Sénégal). 6em. Congrès International de la Science du sol, Paris, 1956, VI,15, 569-576.
- COLLOT (L.) - 1952 - Deuxième contribution à l'étude des oligo-éléments sur l'arachide. Bull. Agro N° 18 (Annales CRA Bambey 1952).
- COLLOT (L.) - Troisième contribution à l'étude des oligo-éléments sur l'arachide. Non publié.
- COLONNA (J.P.) 1964 - Contribution à l'étude du diagnostic foliaire du caféier Excelsa. Café Cacao Thé 1964, VII,4, 264-274.
- COLONNA (J.P.) 1967 a - Le réseau d'expérimentation multilocale de l'IRAT en République Centrafricaine. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux . Tananarive 19-25 Nov.1967, 613-623.

- COLONNA (J.P.) 1967 b - Recherches sur la fertilisation minérale du riz en culture pluviale en République Centrafricaine. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 709-719.
- COLONNA (J.P.) 1968 - Le riz et sa culture en République Centrafricaine. Agronomie Tropicale 1968, XXIII,I, 11-23
- COMBEAU (A.) 1964 - Remarques sur les facteurs de variation des limites d'Atterberg. Cahiers ORSTOM. Pédologie 1964,II,4, 29-39 .
- COMBEAU (A.) 1965 - Variations saisonnières de la stabilité structurale en région tempérée. Comparaison avec la zone tropicale Cahiers ORSTOM, série pédologie 1965, III,2 123-135.
- COMBEAU (A.) - 1970 - Communication personnelle .
- COMBEAU (A.), MONNIER (G.), 1961 - Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux . Sols Africains 1961, VI,I,5-62.
- COMBEAU (A.), OLLAT (C.), QUANTIN (P.) 1961 - Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. Fertilité 1961, Juil.-Août, 27-40.
- 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, 1963,I 5-11.
- COMBEAU(A.), QUANTIN (P.) - 1963 b - Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. Cahiers ORSTOM 1963, Série Pédologie 3, 17-26.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.) 1964 a - Observation sur l'évolution à long terme de la stabilité structurale de certains sols tropicaux sous culture et sous jachère. 8em. Congrès International de la Science du Sol, Bucarest 1964.
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.) 1964 a - Observation sur l'évolution à long terme de la stabilité structurale de certains sols tropicaux sous culture et sous jachère . 8em. Congrès International de la Science du Sol, Bucarest 1964 .
- COMBEAU (A.), QUANTIN (P.) 1964 b - Observation sur les relations entre stabilité structurale et matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. Cahiers ORSTOM, 1964,Série Pédologie, I, 3-12.
- ★ COPE (F.), HUNTER (J.G) - 1967 - Interactions de l'azote et du phosphore. Phosphore et Agriculture, 21^e année, 46, février 1967; I-34. " in " Agronomie Tropicale 1967, I, 361.

- COUEY (M.), BOUYER (S.), CHABROLIN (R), COURTESOLLE (F.) - Réponse du riz à la fumure dans la région du fleuve Sénégal. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 720-730.
- COURT (M.N.), STEPHENS (R.C.), VAID(J.S.) 1964 - Toxicity as a cause of the inefficiency of urea as fertilizer. The Journal of Soil Science, (London) 1964 ; 15 Mars, 42-65.
- COYAUD (Y.) 1956 - La culture du riz à l'Office du Niger. Riz et Riziculture 1956,4, 275-284.
- COYAUD (Y.), LIENART (J.M.) 1966 - La recherche rizicole au Niger. Agronomie Tropicale 1966, XXI,I, 56-64.
- CRETENET (S.) 1967 - La fumure du cotonnier en culture de décrue au Nord Ouest de Madagascar . Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967,I, 1010-1018.
- DABIN(B.) 1951 a - Alimentation minérale du riz - Interprétation d'un essai d'engrais réalisé à l'Office du Niger. Agronomie Tropicale 1951, VI,9,10 , 507-513.
- DABIN (B.), 1951 b - Contribution à l'étude des sols du delta central Nigérien. Agronomie Tropicale 1951, VI,II-12 606-637.
- DABIN (B.) 1953 - Premières notions sur la flore microbienne utile dans les sols du delta central du Niger. Archives de l'Office du Niger. 1953, N° 1.
- DABIN (B.) 1954 - Les problèmes de l'utilisation des sols à l'Office du Niger . 2em Conférence Interafricaine des sols - Léopoldville, 1954, II, 92, 1162-1176.
- DABIN (B.) 1956 - Considération sur l'interprétation agronomique des analyses de sols en pays tropicaux. VI° congrès International de la Science du Sol Paris 1956, IV,58, 403-409.
- DABIN (B.), LENEUT (N.) 1958 - Etude de l'érosion et du ruissellement en basse Côte d'Ivoire: Mai 1956-Mai 1958 . Rapport ORSTOM 20 p. inedit 1958 et par l'auteur en Casamance.
- DABIN (B.), 1959 - Etude de trois années d'érosion à la station d'Adiopodoumé. Rapport interne ORSTOM 1959, inedit .
- DABIN (B.), 1960 - Utilisation d'un indice de structure pour la détermination de la qualité physique des sols tropicaux. 7em. Congrès International de la Science du Sol, Madison, 1960,I, 311-320.
- DABIN (B.) 1961 - Les facteurs de la fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. Bulletin spécial AFES, 1961 p. 103-130.
- DABIN (B.), 1962 - Relations entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux . Annales agronomiques 1962, 13, 2, 113-140 .

- 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 Pédologie 1963 ", 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 Pédologie 1964, I, 5-11.
-
- DABIN (B.), 1964 b - Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte d'Ivoire. Cahiers ORSTOM 1964, Pédologie I, 29-40.
- DABIN (B.), 1965 - Etude pour la reconversion des cultures de caféier dans la République de Côte d'Ivoire. Publication Bureau pour le développement de la production agricole et Ministère de l'Agriculture de la Côte d'Ivoire 1965. Annexe Pédologie t. 1 et 2, 310 p.
- ✦ 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. 1967, 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" Agronomie Tropicale 1968, 184-190.
- DABIN (B.), 1969 - Etude générale des conditions d'utilisation des sols de la cuvette Tchadienne. Travaux et documents ORSTOM, 1969, 199 p., ORSTOM éditeur.
- ✦ DABIN (B.), 1970 a - Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. A paraître dans Coton et Fibres Tropicales 1970 .
- DABIN (B.), 1970 b - La teneur en soufre des sols tropicaux . A paraître au colloque sur le soufre dans les sols. Paris, Décembre 1970, organisé par l'INRA - AFES.
- DABIN (B.), LENEUF (N.) 1960 - Les sols de Bananeraie en Côte d'Ivoire. Fruits, 1960, 15, 3, 117-127 .
- DAGG (M.) , 1968 - Principaux problèmes à étudier en matière d'exploitation des sols tropicaux. Colloque d'Abidjen 1968, t. II, I.
- DANCETTE (C.), POULAIN (J.F.) 1968 - Influence de l'acacia albida sur les facteurs pédoclimatiques et les rendements des cultures. Sols Africains, 1968, XIII,3, 197 - 239 .
- DAVIDSON (D.W.), SHIVE (J.W.) 1934 - Soil Science 1934, 37 - 357. .
- DE (P.K.), MANDAL (L.N.), 1956 - Fixation of nitrogen by algae en rice soils. Soil Science 1956, Juin, 453-458.
- DELBOSC (G.) 1968 - Etude sur la régénération de la fertilité du sol dans la zone arachidière du Sénégal . Oléagineux 1968,23,I 27-33

- DELHUMEAU (M.) 1965 - Notes de Pédologie gabonaise -4- Les sols ferrallitiques jaunes formés sur le socle Granito-gneissique. Cahiers ORSTOM. 1965, Pédologie, III,3 207-221.
- DELORME (M.) 1966 - Le cocotier au Dahomey. Oléagineux 1966, 21,I, 1-4
- DENARIE (J.) 1967 a - Résultats expérimentaux obtenus par inoculation des graines de légumineuses à Madagascar . Colloque fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, II, 1615-1626.
- DENARIE (J.) 1967 b - Orientation des programmes de recherches de microbiologie des sols de Madagascar. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, II, 2188-2200.
- DENARIE (J.) 1968- L'inoculation des légumineuses à Madagascar. Résultats de l'expérimentation de la campagne 1966-1967 Agronomie Tropicale 1968, XXIII,9, 925-966.
- DEUSS (J.) 1967 a - Protection de la fertilité du sol et modes de couverture utilisés en culture caféière en République Centrafricaine. Café Cacao Thé (Paris) 1967, XI,4, 312-320.
- DEUSS (J.) 1967 b - Rentabilité de la fumure du caféier Robusta d'après les résultats de douze années d'expérimentation au centre de recherches agronomiques de Boukoko (République Centrafricaine)- Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 812-825.
- DEUSS (J.) 1969 - Influence du mode d'ouverture de plantation, avec ou sans brulis, sur la fertilité du sol et la productivité des caféiers Robusta en zone forestière Centrafricaine. Café Cacao Thé 1969, XIII,4 , 283-288.
- D'HOORE (J.) 1964 - L'accumulation des sesquioxydes libres dans les sols tropicaux. Publication INEAC, Série Scientifique 1964, 62.
- D'HOORE (J.) 1968 - Influence de la mise en culture sur l'évolution des sols dans la zone de la forêt dense de basse et moyenne altitude. Sols Africains 1968, XIII,2, 155-168.
- DJIBRIL-(A.W.) 1963 - La riziculture dans le delta central Nigérien en République du Mali-Office du Niger. Colloque CCTA sur le riz en Afrique Tropicale, Conakry 16-22 Juin 1963.
- DIDIER de SAINT AMAND (R.) 1968 a - Dynamique des sols hydromorphes organiques malgaches en relation avec la riziculture. chap. III Influence de l'évolution provoquée par drainage du sol le plus hydromorphe de la chaîne sur son aptitude à nourrir les végétaux . Agronomie Tropicale 1968, XXIII,12, 126-308.

- DIDIER de ST AMAND (R.) 1968 b - Dynamique des sols hydromorphes organiques malgaches en relation avec la riziculture. Chap. II conséquences d'ordre pédologique relatives au drainage des dépressions en prenant pour exemple le sol le plus hydromorphe de la chaîne. *Agronomie Tropicale* 1968, XXIII, 6, 7 683-768.
- DIEVEN (G.P.) HERENCRON (K.R.) 1963 - Benestingsproof big Koedzoe. De Surinaamse landbouw, Paramaribo 1963, 2, 39-45.
- DOBELMANN (J.P.), FALAISE (M.) - La culture du riz dans le Nord Ouest de Madagascar .
- DOMMERGUES (Y.) 1952 - L'analyse microbiologique des sols tropicaux acides. Mémoires de l'Institut scientifique de Madagascar, série D, IV, 2, 169-181 1952 .
- DOMMERGUES (Y.) 1953 a - Note précisant la biologie de l'azotobacter indicium ainsi que sa répartition à Madagascar. Mémoires Inst. Sci. Madagascar 1953, série D, V, 327-335 .
- DOMMERGUES (Y.) 1953 b - A propos de l'Azotobacter indicum. Mémoires Inst. Sci. Madagascar 1953. série D, V, 353-356 .
- DOMMERGUES (Y.) 1956 a - Action d'amendements calciques et de phosphate sur l'activité biologique de deux sols du Sénégal. 6ème Congrès International de la Science du Sol, Paris 1956, III, 64, 381-387.
- DOMMERGUES (Y.) 1956 b - Influence de l'engrais vert sur les microorganismes du sol. 6ème Congrès international de la Science du Sol, Paris 1956, III, 65 389-392.
- DOMMERGUES (Y.) 1960 a - La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols . *Agronomie Tropicale* 1960, 15, 54-60.
- DOMMERGUES (Y.) 1960 b - Un exemple d'utilisation des techniques biologiques dans la caractérisation des types pédologiques. *Agronomie Tropicale* 1960, 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. *Agronomie Tropicale*, 1960, XV, 4, 377-389.
- DOMMERGUES (Y.) 1960 d - Minéralisation de l'Azote aux faibles humidités. 7th. Inter. Congress of Soil Science, Madison, Wisc. U.S.A., 1960, III, 672-678.
- DOMMERGUES (Y.) 1962 - Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. *Ann. Agro*, 1962, 13, 4, 265-324
" " " 13, 5 379-569.

- DOMERGUES (Y.) 1967 -Nouvelles possibilités d'étude et d'amélioration de la fertilité des sols tropicaux offertes par les techniques biologiques. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux . Tananarive 19-25 Nov. 1967, II, 1627-1635.
- DROUINEAU(G.), GOUNY (P.), MAZOYER (R.) 1950 - De l'influence du carbonate de calcium sur la nutrition potassique des végétaux . Compte Rendu Séances Acad. Sciences T 230, p. 1966, séance du 31 Mai 1950 .
- DUCHAUFOR (Ph.) 1965 - Précis de pédologie. Edt. Masson, Paris 1965 481 p.
- DUCHAUFOR (Ph.), LELONG (F.) 1967 - Entraînement et destruction de l'argile dans les horizons alluviaux des sols lessivés. C.R. Acad. Sc. Paris 1967, 264, 2884-2887.
- DUGAIN (F.) 1959 - Le sulfate d'ammoniac dans le sol en culture bananière de bas fonds. Fruits, 1959, 14, 4 - 163-169.
- DUGAIN (F.) 1960 a - Etude sur la fertilité des sols de la plaine bananière du Cameroun. Fruits 1960, Vol. XV, 4 - 153-170.
- DUGAIN (F.) b - 1960 b - Les analyses de sol et le " Bleu " du Bananier. 1ere Réunion Internationale Banon FAO et CCTA Abidjan 1960 .
- DUMONT (C.) 1966 - Les recherches rizicoles en Haute-Volta. Agronomie Tropicale 1966, XXI,4, 520-557.
- DUPONT de DIENECHIN (B.) 1967 a - Observations sur l'intérêt des phosphates naturels pour la fumure des céréales en Haute Volta. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I 657-668
- DUPONT de DIENECHIN (B.) - 1967 b - La fumure potassique des cultures vivrières en Haute Volta. Colloque sur la fertilité des sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I 669-679.
- DUPONT de DIENECHIN (B.) - 1967 (c) - Résultats relatifs au Metaphosphate de potasse. Colloque sur la Fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I 858-861.
- DUPONT de DIENECHIN (B.) 1967 d - Observations sur la priorité à accorder en vulgarisation à la fumure des céréales de culture sèche en Haute Volta. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1100 .
- EDMINISTER (T.W.), MILLER (H.F.) 1959 - Recent developments in Agricultural machinery. Advances in agronomy 1959, II, 171 .

- EHRENGRON (K.R.) 1963 - Salt tolerance of rice - Congress Agricultural research in the Guianas, Paramaribo, Surinan 1963.
- ESPINOZA, TENORIO, 1962. Efects de la aplicación de diferentes fertilizantes nitrogenados en el pH del Suelo y en la producción del café. Boletín informativo, 1962, 17, ISIC, Santa Teila Salvador .
- EVANS (E.J.) 1956 - Role of Molybdenum in plant nutrition. Soil Science 1956, vol. 81-3, 199-208 .
- F.A.O. - U.N.E.S.C.O. - 1968 - Definitions of soils units for the soil map of the World. World soil resources reports N° 33.
- FAUCK (R.) 1955 - Etude pédologique de la région de Sédhiou Moyenne Casamance. Agronomie Tropicale 1955, X, 6 - 752-793.
- FAUCK (R.) 1956 a - L'évolution du sol sous culture mécanisée. Le problème du pH et sa correction . 6ème Congrès international de la Science du Sol Paris, 1956, IV, 55 - 379-382.
- FAUCK (R.) 1956 b - Le riz de culture sèche et l'évolution des sols. 6ème Congrès International de la Science du Sol. Paris, R, 12 - 549-553.
- FAUCK (R.) 1968 - Prospection, cartographie pédologique et mise en valeur. Colloque d'Abidjan 1968, II 33-40.
- FAUCK (R.) 1970 - Thèse en préparation .
- FAUCK (R.), MOUREAUX (C.), THOMANN (Ch.) 1969 - Bilans de l'évolution des Sols de Sefa (Casamance Sénégal) après 15 années de culture continue. Agronomie Tropicale 1969, 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 proposés. Agronomie Tropicale 1962, XVII, 7, 8, 472 - 491.
- FAURE (J.), GINOUVES (J.) 1955 - Note sur une méthode de détermination rapide des besoins en potasse de l'arachide par l'analyse des sols. Bull. Agro. N° 15 (Annales CRA Bambey 1955 88-91).
- FERRANDO - 1959 - Les bases de l'alimentation . Vigot. Zdt. 1959 .
- FORESTIER (J.) 1959 - Fertilité des sols de caféières en République Centrafricaine. Agronomie Tropicale 1959, XIX, 3 306-348.
- FORESTIER (J.) 1960 - Fertilité des sols de caféières en République Centrafricaine. III Etude des sols des caféières de la Lobaye. Agronomie Tropicale 1960, XV, I 9-37 .

- FORESTIER (J.) 1964 - Relations entre l'alimentation du coffea Robusta et les caractéristiques analytiques des sols. Café Cacao Thé, 1964, VIII,2 89-112.
- FORESTIER (J.) 1966 - Aspects nouveaux de l'emploi des engrais sur Coffea Robusta au Centre de Recherches de Boukoko (République Centrafricaine) Café Cacao Thé (Paris) 1966, X, 2 126-132 .
- FORESTIER (J.), BELEY (J.) 1966 - Teneurs en soufre et en oligo-éléments des feuilles du Caféier Robusta en Lobaye. Café Cacao Thé (Paris), 1966, X, 17-27.
- FORESTIER (J.) BELEY (J.) 1969 - Variabilité de la Nutrition minérale et de la production des clones de caféiers Robusta. Café Cacao Thé, 1969, XIII, 4, 290-295 .
- FOURNIER (F.) 1967 - La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain. Sols Africains, XII,I,5 5-52.
- FRANQUIN (P.) 1958 - L'estimation du manganèse du sol en rapport avec le phénomène de toxicité. Coton et Fibres Tropicales 1958, XIII,3, 1;16 .
- FRANQUIN (P.), MARTIN (G.) 1962 - Bilan d'eau et conservation du sol au Niari République du Congo . Coton et Fibres Tropicales 1962, XVII, 3 345-356.
- FREMOND (Y.) 1965 - Contribution de l'IRHO à l'étude de la nutrition minérale du cocotier. Oléagineux 1965, 20,2, 89-95.
- FREMOND (Y.) VILLEMAIN (G.) 1964 - Fumure minérale sur cocoteraie âgée en Côte d'Ivoire . Oléagineux 1964,19,6 403-409.
- FREMOND (Y.), BRUNIN (Ch.) 1966 - Cocotier et couverture du sol. Oléagineux 1966, 21,6 361-364.
- FREMOND (Y.), NUCE de LAMOTHE (M.) 1968 - Nutrition minérale du Cocotier. Colloque Abidjan 1968, II 480-492.
- FRITZ (J.) 1967 - Essai de fertilisation azotée sur Chloris Gayana aux colimaçons. Ile de la Réunion. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1035-1045 .
- GADET (R.) 1967 - Minéralisation de l'azote dans quelques sols tropicaux. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux Tananarive 19-25 Nov. 1967. 505-509.
- GADET (R.), SOUBIES (L.) 1967 - Les mouvements de l'Azote minéral dans les sols et leurs conséquences pour la production agricole. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux Tananarive 19-25 Nov. 1967. 509-512.

- GASTUCHE (M.C.) DELMON (B.) VIELVOYE(L.), 1960 - La cinétique des réactions hétérogènes. Attaque du réseau silico-aluminique des kaolinites par l'acide chlorhydrique. Bull. Soc. Chim. FR. 1960, I, 60-70.
- GAUDEFROY-DEMONBYNES (Ph.), CHARREAU (C.) 1961 - Possibilité de conservation de l'humidité dans les sols pendant la saison sèche. Influence corrélative sur le degré d'ameublissement du sol. Agronomie Tropicale 1961, XVI, 3 233-254.
- GAUTREAU J. 1966 - Influence du régime des eaux sur l'efficacité des engrais dans la culture de l'arachide au Sénégal. Oléagineux 1966, 21,4 217-227.
- GILLIER (P.) 1960 - La reconstitution et le maintien de la fertilité des sols du Sénégal et le problème des jachères. Oléagineux 1960, 15,8-9, 637-643
" " 15,10 699-704.
- GILLIER (P.) 1964 - Les coques d'arachides. Leur utilisation en Agriculture. Oléagineux 1964, 19,7 473-555.
- GILLIER (P.) 1967 - L'arachide et la fumure organique. Oléagineux 1967, 22,2 89-93.
- GILLIER (P.) 1960 - Fumures minérales de l'arachide au Sénégal. Oléagineux 1960, 15, II, 783-791.
- GOARIN (P.), DIDIER de SAINT AMAND (R.) 1957 - Influence des herbicides sur la vie microbienne d'une rizière .
- GODEFROY (J.) LOSSOIS (P.) 1966 - Variations saisonnières des caractéristiques physico-chimiques d'un sol volcanique au Cameroun. Fruits 1966, 21,10 535-545.
- GODEFROY (J.) 1967 a - Relations entre la fertilité du bananier et les caractéristiques structurales dans les sols de la station d'Ivoloina - Madagascar .
- GODEFROY (J.) 1967 b - L'amendement des sols de bananeraies en Côte d'Ivoire. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux Tananarive 19-25 Nov. 1967, I 1007-1009.
- GODEFROY (J.) 1969 a - Le développement des racines de bananier dans divers sols : relation avec la fertilité. Fruits 1969, 24,2 101-104.
- GODEFROY (J.) 1969 b - Action des plantes améliorantes en culture d'ananas. III, Bilan pédologique. Fruits 1969, 24,7-8, 380-386.
- 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, 1969, 24, I 21-42.

- GODEFROY (J.), LECCQ (J.) LOSSOIS (P.) 1969 - Evolution des caractéristiques chimiques et structurales d'un sol volcanique sous culture bananière . Fruits 1969, 24,5 257 - 271
- GOLDSWORTHY (P.R.) Fertilizer Trials with soja beans in Northern Nigeria. Empire J. Expt. Agric.
- 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. 1964 .
- GROULEZ (J.) 1967 a - Essais Agronomiques d'engrais sur diverses espèces d'Eucalyptus à Pointe Noire. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1203-1208.
- GROULEZ (J.) 1967 b - Note sur un essai de fertilisation sur Eucalyptus à Pointe Noire . Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1209-1219.
- GUILLAUME(M.) 1962 a - Aperçu sur les possibilités de développement de la production du sucre au Mali. Agronomie Tropicale 1962, XVII,7,8, 492-503 .
- GUILLAUME (M.) 1962 b - Possibilités techniques et économiques de la production de sucre en Côte d'Ivoire . Agronomie Tropicale 1962, XVII, 7,8, 504-530 .
- GUILLEMOT (J.) 1965 - Les variations de l'azote minéral dans le sol et la morphologie des bananes. Fruits, 1965, 20,9, 483-504 .
- GREENLAND (D.J.) 1965 - Is aerobic denitrification important in tropical Soils ? 6em. Congrès International de la Science du Sol. Paris 1956, II, 52, 765-769 .
- GREENWOOD (M.) 1951 - Fertilizers trials with groundnuts in Northern Nigeria. Empire J. Expt. Agri. 19, 76 225-241.
- GREENWOOD (M.) 1954 - Sulphur deficiency in groundnuts in Northern Nigeria . 5ème Congrès International de la Science du Sol, Léopoldville 1954, 3, 245-251.
- 1967-
- HADDAD (G.) / Résultats expérimentaux sur l'alimentation hydrique du riz pluvial à Séfa Casanance Sénégal. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 1967, 19-25 Nov. II, 1586.
- HAUCK (F.W.) 1967 - Travaux d'expérimentation en vue de l'établissement des recommandations sur les engrais en Afrique Occidentale. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1220-1235.

- HARDY (G.W.), KEOGH (J.L.), MAPLES (R.), 1963 - Lining acid soils increases soybean Yields. Arkansas farm research, Fayetteville 1963 XII,1,2.
- HENNIN (S.), MONNIER 1958 - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Ann. Agron. 1958, I, 71-90.
- HERVIEU (J.), NALOVIC (L.) 1965 - Dosage des éléments Cobalt, Nickel, Cuivre et Zinc et leur distribution dans quelques types de sols de Madagascar. Cahiers de l'ORSTOM; 1965 Pédologie III, 3 237-267.
- HEWITT, BOLLE, JONES (J.) 1953 - Hort. Sci. 1953, 28, 185-195 .
- HILGER (F.) 1964 - Comportement des bactéries fixatrices d'azote du genre Beijerinckia à l'égard du pH et du calcium . Annales de l'Institut Pasteur 1964, 166, 2 279-291.
- HOMES (M.V.) 1964 - Les interactions du soufre dans le sol et dans la plante. 5ème Symposium International Agrochimica. Le soufre en Agriculture . Palerme-Catane 16-21 Mars 1964.
- HUDSON (N.M.) 1957 - Erosio Control Research. Rhodesia Agri. J. 54, 297.
- INGEBRETSEN(K.), MARTIN (W.E.), VLAMIS (J.), JETER (R.) 1959. Iron deficiency of rice, crop failures in localised areas within productive fields corrected in tests conducted in Glenn and Colusa Counties . California Agriculture, Berkeley, 1959 Février 6-8.
- I.R.H.O. Departement Palmier 1968
Les symptomes de carence en Azote chez le palmier à huile. Oléagineux 1968, 23, I 648.
- I.R.H.O. Departement Palmier 1968 - Les symptomes de carence en potasse chez le palmier à huile. Oléagineux 1968, 23, 12 - 713-714.
- I.R.A.T. 1968 - Les céréales en Afrique. Situation actuelle et perspectives de développement économique. Agronomie Tropicale 1968, XXIII, 8, 878-910.
- I.R.A.T. - I.R.A.M. 1968 - Recherche rizicole à Madagascar . Colloque d'Abidjan 1968, II - 171 - 174 .
- I.R.C.T. 1967 - Contribution des stations de Kogoni et N'Tarla - M'Pesoba à la recherche d'une agriculture intensive. Bilan de cinq années d'activité 1962-1966. Coton et Fibres Tropicales 1967, XXII, 4 455-462 .
- I.R.C.T. 1969 -" Activité de l'I.R.C.T. en 1967-1968. Station centrale de Banbari ". Nature des engrais phosphatés. Coton et Fibres Tropicales 1969, XXIV, I 35-36.
- 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. 6eme Congrès Intern. Science du Sol, Paris 1956, III, 58 343-347.

- JACQUINOT (L.) 1964 - Contribution à l'étude de la nutrition minérale du Sorgho Congossane (Sorghum Vulgare, var. Guineense)
Agronomie Tropicale 1964, XIX,8,9, 669-722.
- JACQUINOT(L), NICOU (R.) - 1965 - La nutrition minérale du Sorgho en différentes conditions de fertilité, contrôle par diagnostic foliaire. Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility. Khartoum 1965, 494-506.
- JACQUINOT (L.) 1965 - Fixation des phosphates par les sols de culture de décrue dans la région de Kaedi. Etude au moyen de 32 P. Agronomie Tropicale 1965,XX,6-7, 593-599.
- JACQUINOT (L.) 1967 - Croissance et alimentation minérale comparées de quatre variétés de Niebe. Vigna unguiculata.
Agronomie Tropicale 1967, XXII,6,7 575-640.
- JAIJEBO (E.O.), MOORE (A.W.) 1963 - Nature 1963, 197, N° 4864,p.318
- JARRET (H.O.) 1968 - Pédologie, amélioration des sols facteur de développement économique de l'Agriculture en Afrique Tropicale. Colloque d'Abidjan 1968,t.II 25-31.
- JAUBERT (P.) 1952 - Deuxième étude sur la symbiose bactérienne des légumineuses du Sénégal, Casamance comprise.
Bull. Agro. N° 8 (Annales CRA Bambey 1952) 155-161.
- JAUBERT (P.) 1953 - Symbiose bactérienne de l'arachide au Sénégal.
C.R. VI° Congrès international de Microbiologie Rome 5-13 Sept. 1953. "in" Agronomie Tropicale 1953, VIII, 5, 509.
- JEFFERY(J.W.O.) 1963 - Fertilizers Trials on Sierra Leone Swamp rice Soils. Colloque CCTA sur le riz en Afrique Tropicale Conakry 16-22 Juin 1963 "in" Agronomie Tropicale 1963 XVIII,8.
- JENNY(Y.Y.) 1965 - Sols et problèmes de fertilité en Haute-Volta.
Agronomie Tropicale 1965, XX,2, 220-247.
- JEWITT (T.N.) 1956 - Cotton yields in Sudan Gezira as affected by rotation. 6ème Congrès International de la Science du Sol. Paris 1956,IV, 427.
- JULIA(H.)1953 -Observations concernant l'incidence de la couverture du sol sur le maintien de la fertilité des terres cultivées dans la vallée du Niari. Oléagineux 1953,8 7, 489-492.
- JULIA (H.) 1962 - La station de Sibiti . Oléagineux 1962,17,4 356-360

- KAUFFMANN (J.) 1951 - Contribution à l'étude physiologique de quelques germes oligonitrophiles du sol . 1951, Librairie Générale de l'enseignement éditeur.
- KAUFFMANN (J.), TOUSSAINT (P.), BOQUEL (G.) 1952 - Sur le pouvoir fixateur de l'azote atmosphérique des régions tropicales Annales Inst.Pasteur 1952, 83, 5 713-718.
- KAUFFMANN (J.) BOQUEL (G.), TOUSSAINT (P.) 1956 - Sur le rapport entre le pouvoir cellulolytique fixateur de l'azote atmosphérique ammonificateur et nitrificateur des terres. Essais d'application à la classification biologique des sols. Agronomie Tropicale 1956, XI, I, 93-102.
- KILIAN (J.) 1964 - Etude pédologique des Baibos de la Bemarivo. Agronomie Tropicale 1964, XIX, II, 998-1017
- KILIAN (J.) 1970 -Etude des sols tourbeux et semi-tourbeux utilisés en culture bananière dans la région de Tamatave. Fruits 1970 - 25,I,35,45.
- KILIAN (J.) 1970 - Communication personnelle .
- KLAVER (H.) 1967 - Evapotranspiration et économie de l'eau des cultures. Coton et Fibres Tropicales 1967, XXII,2, 275-295.

- LACHOVER (D.), AMIR (Y.), GOLDIN (A.) - 1963 - Influence d'engrais verts et d'engrais azotés sur le rendement et la qualité des arachides. Oléagineux 1963, 18, 3, 153-156.
- LACHOVER (D.), ARNON (J.) - 1964 a - Influence sur l'arachide du manque de potassium de certains sols. Détermination de la déficience. Oléagineux 1964, 19, 1, 11-17.
- LACHOVER (D.), ARNON (J.) - 1964 b - Apparition de la rouille du cotonnier sur certains sols d'Israël souffrant d'une carence en potassium et méthode de diagnostics. Coton et Fibres tropicales 1964, XIX, 2, 279-292.
- LACHOVER (D.) - 1966 - La réponse de l'arachide de bouche en culture irriguée à l'apport de produits calciques. Oléagineux, 1966, 21, 2, 83-89.
- LAMOURCUX (M.) - 1956 - Etude de la fertilité et de l'utilisation des sols ferrugineux tropicaux du Moyen-Togo. 6ème Congrès Internationale de la Science du Sol, Paris 1956, IV, 61, 423-426.
- LAUDELOUT (H.) - 1954 - Etude sur l'apport d'éléments minéraux résultant de l'incinération d'une jachère forestière. 11ème Conférence Interafricaine des sols, Léopoldville 1954, 1, 383-388.
- LAUDELOUT (H.), MEYER (J.) - 1954 - Les cycles minéraux et de matière organique en forêt équatoriale congolaise. VIème Congrès Interafricain de la Science du Sol, Léopoldville 1954, II, 2, 67, 267-272.
- LATHAM (M.) - 1969 - Contribution à l'étude du facteur sol sur le développement du cotonnier en Côte d'Ivoire. Rapport interne ORSTOM 1969, inédit 62 p.
- LE BUANEC - 1970 - Communication personnelle.
- LENEUF (N.) - 1959 - L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. ORSTOM 1959, 210 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. Agronomie Tropicale, 1959, XIV, 6, 657 p.
- LIENART (J.M.), NABOS (J.) - 1967 - Les recherches sur la fertilisation de l'arachide et l'amélioration foncière des sols au Niger. Colloque fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1046-1057.
- LOUE (A.) - 1957 - La nutrition minérale du caféier en Côte d'Ivoire. Bulletin du Centre de recherches de Bingerville 1957.
- LOUE (A.) - 1960 - Nouvelles observations sur les oligo-éléments dans la nutrition minérale du caféier (Coffea canephora Pierre). Café Cacao Thé, 1960, IV, 3, 133-149.
- LOUE (A.) - 1961 - Etude des carences et des déficiences minérales sur le cacaoyer. IFCC, (Paris), Bulletin n° 1, Avril 1961.

- LOUE (A.) - 1962 - Etude des carences et déficiences en potassium, calcium et magnésium chez le caféier Robusta. IFCC, Bulletin n° 4, 1962, 48 p.
- LOUE (A.) - 1967 - Communication sur la fertilisation du Maïs. III pratique de la fumure minérale de base. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1154-1163.
- MACUBA (J.), KUNC (F.) - 1961 - Continuous flow method in microbiology. II Observation on glucose metabolism. Fol. microbiolog. 1961, 6, 398-407.
- MAIGNEN (R.) - 1955 - Sols à Bananiers de la région de Kindia. Agronomie Tropicale 1955, X, I, 60-78.
- MAIGNEN (R.) - 1959 - Les sols subarides du Sénégal. Agronomie Tropicale 1959, XIV, V, 529-571.
- MAISTRE (J.) - 1956 - Contribution à l'étude de la nutrition minérale de l'arachide (Arachis hypogea). La carence borique et ses effets. Agronomie Tropicale 1956, XI, 3, 310-360.
- MARQUETTE (J.) - 1966 - L'arachide de bouche en Israël. Agronomie Tropicale 1966, XXI, 10, 1148-1154.
- MARTIN (D.) - 1969 - Les sols hydromorphes à pseudo-gley lithomorphes du Nord Cameroun (2ème partie). Cahiers ORSTOM, série Pédologie 1969, VII, 3, 311-343.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.) - 1966 a - Le département du Mungo (Ouest Cameroun). Etude des sols et leur utilisation. Cahiers ORSTOM 1966, série Pédologie, IV, I, 27-49.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.) - 1966 b - Les sols rouges du Nord Cameroun. Cahiers ORSTOM 1966, série Pédologie, IV, 3, 3 p.
- MARTIN (G.) - 1959 - La décalcification des terres au Niari. Action des amendements calcaires. Oléagineux 1959, 14, 213-220.
- MARTIN (G.) - 1961 - Essai d'appréciation des pertes en calcium et magnésium après un apport d'amendement calcaire dans les sols de la vallée du Niari. Rapport ORSTOM 1961, non publié.
- MARTIN (G.) - 1963 - Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. Cahiers ORSTOM, série Pédologie 2, 8-14.
- MARTIN (G.) - 1964 - IN Quinze ans de travaux et de recherches dans les Pays du Niari 1949-1954. 3ème 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.) IRHO - 1964 - La fumure de l'arachide dans le monde. Oléagineux 1964, 19, 3, 161-167.

- MARTIN (G.) - 1969 - Quelques symptômes de carences en bore chez le palmier à huile. Oléagineux 1969, 24, II, 613-614.
- MARTIN (G.), FOURRIER (P.) - 1965 - Les oligo-éléments dans la culture de l'arachide du Nord du Sénégal. Oléagineux 1965, 20, 5, 287-291.
- MARTIN (G.), PELLOUX (P.) - 1970 - Communication personnelle.
- MARTIN-PREVEL (P.) - 1953 - Carences en potassium sur ananas en Guinée. Fruits 1959, 14, 7, 285-289.
- MARTIN-PREVEL (P.) - 1961 - Potassium, Calcium et Magnésium dans la nutrition de l'ananas en Guinée. II Influence sur le rendement commercialisable. Fruits 1961, 16, 3, 113-123.
- MARTIN-PREVEL (P.) - 1963 - Le bilan minéral : bases d'interprétation du diagnostic foliaire. IFAC Journées d'étude sur la nutrition minérale des plantes fruitières tropicales et subtropicales, Paris 1963, 67-85.
- MARTIN-PREVEL (P.) - 1966 - Influence de doses massives d'engrais sur la composition minérale du régime de bananes. Fruits 1966, 21, 4, 175-185.
- MARTIN-PREVEL (P.) - 1967 - Conception des études agrophysiologiques de nutrition minérale à l'IFAC. Colloque fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, 1, 260-267.
- MARTIN-PREVEL (P.) - 1969 - Un essai sur variation systématiques sur Bananier. Fruits 1969, 24, 4, 193-215.
- MARTINE (P.), BOUYER (S.) - 1951 - La fumure des rizières à Richard Toll. Agronomie Tropicale VI, 7,8, 1951, 370-383.
- MARTINE (P.) - 1954 - Recherche d'un assolement à Richard Toll. Rapport du casier expérimental de Richard Toll. 1954 inédit. "in" Agronomie Tropicale 1967, XXII, 10, 934-936.
- MAUBOUSSIN (J.C.) - 1968 - Problèmes agronomiques posés par la culture de l'arachide en zone de savane. Résultats acquis, recherches en cours, objectifs. Colloque d'Abidjan 1968, II, 237-252.
- MAYMARD (J.) - 1957 - Etude expérimentale des facteurs naturels influant sur les cultures de décrues. Essai de Guedé 1956-1957. Fascicule A. Rapport ORSTOM 1957 inédit.
- MAYMARD (J.), COMBEAU (A.) - 1960 - Effet préjudiciable de la submersion sur la structure du sol. Sols Africains 1960, V, 2, 123-140.
- MAYMARD (J.) - 1967 - Région du Sud-est. Etude Socio-économique et Agriculture. Ministère du plan Côte d'Ivoire.
- MAYMARD (J.) - 1970 - Communication personnelle. IRAT. - Rapport annuel Richard Toll. 1969.

- MAYMARD (J.) - 1970 - Communication personnelle.
- MEGIE (G.) - 1960 - Facteur structure et comportement du cotonnier sur les argiles récentes du Logone au casier au Nord-Bongor. Coton et Fibres Tropicales 1960, XXV, 3, 383-387.
- MEGIE (G.) - 1966 - Rôle du pH dans l'effet toxique de l'azote ammoniacal sur le cotonnier. Coton et Fibres tropicales 1966, XXI, 2, 204-208.
- MEGIE, GUIBERT, LANCEREAUX, ANDRY, VIZIER - Note sur l'action des fumures sur les rendements en culture continue Coton-Sorgho. Colloque sur la fertilité des Sols Proticaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1095-1099.
- MERIAUX (S.) - 1958 - Stabilité structurale et composition des sols. C.R. Acad. Agri. Nov. 1958, 16, 799-803.
- MEYER (J.A.) - 1959 - Fluctuations de l'azote minéral dans les sols sous cultures vivrières. IIIème Conférence Interafricaine des sols, Dalaiba 1959.
- MIGUET - 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. 1967, II, 1264.
- MINISTRY of AGRICULTURE, NORTHERN NIGERIA - 1963 - Triennial report of the northern Nigerian Ministry of Agriculture. Gaskiya Corporation, Zaria, 57.
- MOITY (M.) - 1954 - La carence en zinc sur bananier. Fruits 1954, 9, 8, 354.
- MOITY (M.) - 1961 - La carence en cuivre des tourbières du Niéky, Côte d'Ivoire. Fruits 1961, 16, 8, 399-401.
- 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. 1963.
- MONNIER (G.) - 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Annales agronomiques, 1965, 16, 4, 327-400. 1965, 16, 5, 475-534.
- MONTAGUT (G.) - 1963 - Evolution des engrais Azotés dans le sol. Résultats d'un essai sur sol nu en Martinique. Fruits 1963, 18, 3, 141-144.
- MONTAGUT (G.), MARTIN-PREVEL (P.) - 1965 - Besoins en engrais des bananeraies antillaises. Fruits, 1965, 20, 3, 265-273.
- MOREL (R.), MASSON (P.) - 1958 - Etude de la structure du sol des parcelles du champs d'expérience de la Station Agronomique de Grignon. C.R. Acad. Agri. Avril 1958, 8, 406-410.
- MOULINIER - 1962 - Contribution à l'étude agronomique des sols de Basse Côte d'Ivoire. Bull. Inst. Français du Café et du Cacao, n° 3, Mars 1962.

- MOUREAUX (C.) - 1957 - Les tests biochimiques de l'activité de quelques sols malgaches. Mémoires IRSM, Série D, 225-241 (1957).
- MOUREAUX (C.) - 1959 - L'activité microbiologique et ses variations dans l'année en divers sols des hauts plateaux malgaches. Mémoires Inet. Sci. de Madagascar 1959, D, IX, 121-195.
- MOUREAUX (C.) - 1965 - Glycolyse et activité microbiologique globale en divers sols Ouest-africains. Cahiers ORSTOM, série Pédologie 1965, III, I, 43-78.
- MOUREAUX (C.) - 1967 - Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols Ouest-Africains. Cahiers ORSTOM, série Pédologie 1967, V, 4, 393-420.
- MOUREAUX (C.), FAUCK (R.) - 1967 - Influence d'un excès d'humidité temporaire sur quelques sols de l'Ouest-Africains. Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie 1967, V, I, 103-113.
- NABOS (J.) - 1966 - Etat actuel des recherches d'amélioration variétale et de technique culturale sur le mil et le sorgho au Niger. Sols Africains 1966, XI, 1-2, 347-363.
- NGO-CHAN-BANG - 1957 - Méthode et appareil pour l'étude dynamique de la structure des sols. Application à divers cas agronomiques de Madagascar. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1957, 51-68.
- 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. 1967, 86-98.
- NGO-CHAN-BANG - 1968 - Proposition de nouveaux indices pour caractériser la structure d'un sol. Applications à quelques cas Agronomiques. Agronomie Tropicale 1968, XXIII, 12, 1309-1327.
- NICOU (R.) - 1965 - Note sur l'intensification de l'agriculture tropicale sèche. Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility. Khartoum 1965, 232-237.
- NICOU (R.), POULAIN (J.F.) - 1967 - La fumure minérale du Niébé au Sénégal. Coll. Fert. Sols Trop. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 731-754.
- NOURISSAT (P.) - 1965 - Problèmes posés par l'implantation des prairies temporaires au Sénégal. Premiers résultats. Agronomie Tropicale 1965, XX, 5, 495-511.
- NYE (P.H.) - 1959 - Divers effets de la végétation naturelle sur les Sols d'Afrique Occidentale et sur leur évolution sous culture. Colloque CCTA. UNESCO. Abidjan 1959.
- NYE (P.H.), GREENLAND (D.J.) - 1960 - The soil under shifting cultivation. Comm. 51, Comm. Bur. Soils, Harpenden.

- OBI (J.K.) - 1959 - The Standard DNPk experiments. Technical report n° 8, Ministry of Agriculture, Samaru, 1959.
- 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 1963, 18, 4, 231-238.
- OCHS (R.) - 1965 a - Contribution à l'étude de la fumure potassique du palmier à huile. Oléagineux 1965, 20, 6, 365-321.
- OCHS (R.) - 1965 b - Contribution à l'étude de la fumure potassique du palmier à huile. Oléagineux 1965, 20, 8-9, 497-501.
- OCHS (R.) - 1968 a - L'aménagement des sols et des eaux pour la culture du palmier à huile. Colloque d'Abidjan 1968, II, 41-49.
- OCHS (R.) - 1968 b - Principaux problèmes de la nutrition du palmier à huile. Colloque d'Abidjan 1968, II, 420-436.
- OCHS (R.), OLIVIN (J.) - 1965 - Réserve en eau d'une palmeraie adulte. Oléagineux 1965, 20, 4, 231-235.
- OFORI (C.S.) - 1965 - Response of groundnuts to phosphate fertilizers in granitic-soils of the Upper Région in Ghana. Agronomie Tropicale 1965, XX, 5, 489-494.
- OKUDA (A.), TAKAHASHI (E.) - 1964 - Le rôle du Silicium. Symposium sur la nutrition minérale du riz. Institut International de recherches sur le riz. Manille Philippines 23-28 Fév. 1964.
- OLAGNIER (M.), PREVOT (P.) - 1956 - Comparaison du diagnostic foliaire et de l'analyse des sols pour la détermination des besoins en engrais de l'arachide. Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales. IRHO, Paris 1956, 262-271.
- OLLAGNIER (M.), PREVOT (P.) - 1967 - L'organisation des recherches sur la fertilisation à l'IRHO. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. 1967, 128-149.
- 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 1960, 5, 3, 343-380.
- PARKER (M.B.), HARRIS (H.B.) - 1962 - Soybean response to Molybdenum and lime and the relationship between yield and chemical composition. Agronomy Journal, Madison, 1962, 54, 6, 480-483.
- PEREIRA-BARRETO (S.) - 1964 - Reconnaissance Pédologique du Ferlo-Sud. ORSTOM, Centre Péd. Hann. Rap. mission 1964.

- PIERI (C.) - 1967 a - Bilan des recherches sur la fumure phosphatée au Mali. Colloque sur la fertilité des Sols Tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. 1967, I, 1139-1148
- PIERI (C.) - 1967 b - Etude de l'érosion et du ruissellement à Sefa au cours de l'année 1965. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 1967, II, 1302-1315.
- PIGGOTT (C.J.) - 1956 - The maintenance of fertility in Sierra Leone Soils. 6ème Congrès International de la Science du Sol. Paris 1956, IV, 32, 213-216.
- PINTA (M.) - 1962 - Recherches et dosage des éléments traces. Dunod ed. 1962, 726 p.
- PINTA (M.) - 1966 - Detection and determination of traces elements publisher. Israël program for Scientific translation. Jerusalem. 1966, 588 p.
- PIRSON (A.) - 1955 - Fonctionnal aspects in minéral nutrition of green plants. Ann. Rev. Pl. Phys. 1955, 6, 71-114.
- PONNAMPERUMA (F.N.) - 1955 - The chemistry of submerged Soils in relation to the growth and Yied of rice. Thesis, Cornell University 1955.
- PONNAMPERUMA (F.N.) - 1958 - Lime as remedy for a physiological disease of rice associated with excès of iron. International rice commision Bangkok Mars 1958, VII, I.
- PONNAMPERUMA (F.), BRADFIELDS (R.), PEECH (M.) - 1956 - The chemistry of submerged Soils in relation to the growth of rice. VIème Congrès de la Science du Sol Paris 1956, Vol C, p. 503.
- PORTERES (R.) - 1952 - Aménagement de l'économie agricole et rurale du Sénégal. Rapport ronéoté, 1952, inédit.
- PORTERES (R.) - 1955 - Projet de l'aménagement de l'économie agricole du Sénégal. Sols africains 1955, III, 2, 182-235.
- PORTERES (R.), FAUCK (R.) - 1961 - Etude d'économie agricole et rurale en Casamance, possibilités d'implantation d'une agriculture modernisée sur les plateaux de la moyenne Casamance. Ministère de l'Économie Rurale, Dakar, Mars 1961, 89.
- PORTERES (R.), FAUCK (R.) - 1963 - L'engrais vert à Sefa. Rapport inédit 33 p.
- POULAIN (J.F.) - 1960 - Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux (Sol Dior). Les principaux facteur de leur fertilité. Rapport de stage ORSTOM, inédit.
- POULAIN (J.F.) - 1965 - Contribution à l'étude des mécanismes d'action de la fumure. Effet sur le sol et les rendements des cultures. Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility, Khartoum, 1965, 131-148.

- POULAIN (J.F.) - 1967 a - Intérêt et limites des analyses physico-chimiques dans l'établissement du diagnostic de la fertilisation. Exemple de la fumure annuelle à doses faibles. Proposition pour une meilleure efficacité des analyses de sol dans les études d'évolution des sols sous culture. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, 116-127.
- POULAIN (J.F.) - 1967 b - Compte-rendu des débats du groupe II-I. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 461.
- POULAIN (J.F.) - 1967 c - Résultats obtenus avec les engrais et les amendements calcaïques. Acidification des sols et correction. Colloque fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 469-489.
- POULAIN (J.F.) - 1969 - Bilan de l'essai : forme du phosphate de fond Bambey. Documentation interne CRA Bambey 1969 inédit.
- POULAIN (J.F.) - 1970 a - Premier bilan des essais sulfate-urée CRA Bambey. Résultats agronomiques de 4 années 1966-1969. Document interne CRA Bambey inédit.
- POULAIN (J.F.) - 1970 b - Comparaison du phosphal et du phosphate de Taïba en fumure de fond. Document interne CRA Bambey inédit.
- POULAIN (J.F.) - 1970 c - Premier bilan : essai phosphore-soufre. Sinthiou-Malène 1ère rotation. Document interne CRA Bambey inédit.
- POULAIN (J.F.) - 1970 d - Communication personnelle.
- PREVOT (P.) - 1964 - A propos de la fertilité des Sols du Sénégal. Oléagineux 1964, 19, 2, 65-71.
- PREVOT (P.), OLLAGNIER (M.), AUBERT (G.), BRUGIERE (J.M.) - 1955 - Dégénération du sol et toxicité manganique. Oléagineux 1955, 10, 4, 239-243.
- PREVOT (P.), OLLAGNIER (M.) - 1959 - Epuisement du sol et effet des fumures minérales dans un assolement continu arachides-mil. Oléagineux, 1959, 14, 423-431.
- PREVOT (P.), MARTIN (G.) - 1964 - Comparaison des fumures organiques et minérales pour l'arachide en Haute-Volta. Oléagineux 1964, 19, 8-9, 533-537.
- PREVOT (P.), OLLAGNIER (M.) - 1964 - Carences en soufre de l'arachide en Afrique. 5ème Symposium International Agrochimica. Le soufre en Agriculture. Palerme-Catane 16-21 Mars 1964.
- PY (C.) - 1962 - Comparaison de l'urée et du sulfate d'ammoniac pour la fumure de l'ananas en Guinée. Fruits 1962, 17, 2, 95-97.
- PY (C.) - 1963 - Recherches sur la fumure de l'ananas. Journée d'étude sur la nutrition minérale des plantes fruitières tropicales et subtropicales. Paris 3-4 Oct. 1963. Fruits 1963, 18, 10, 459-460.
- PY (C.) - 1964 - La fumure de l'ananas en Guinée. Fruits 1964, 19, 9, 529-539.

- QUILLON - 1967 - Compte rendu des débats du groupe II-I. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 41.
- RAMBERT (J.), SEGALA - 1922-1926 - Compte rendu des travaux de la station expérimentale de l'arachide. 1922-1926 Saint-Louis, 1927 20p.
- RAPPORT de SYNTHÈSE, GROUPE II-I - 1967 - Colloque sur la fertilité des Sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, p. 458, 429-432, 433-434, 435, 429-439, 429-450.
- RICHARD (L.) - 1966 - Les études de Nutrition minérale chez les végétaux contribution à leur méthodologie. Coton et Fibres Tropicales 1966, XXI, 3, 291-328.
- RICHARD (L.) - 1967 a - Evolution de la fertilité en culture cotonnière. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, II, 1437-1471.
- RICHARD (L.) - 1967 b - Evolution de la fertilité en culture cotonnière intensive. Coton et Fibres Tropicales, 1967, XXII, 3, 357-391.
- RINGUELET (R.) - 1956 - Une étude d'un ingénieur sur le riz et le sel. La terre Marocaine (Rabat) 1956, n° 321, 252-255.
- RIQUIER (J.) - 1955 - Les effets du Krilium sur la structure de deux types de sols tropicaux. Sols Africains 1955, III, 2, 238-249.
- RIQUIER (J.), RATASILAHY - 1960 - Les sols de la station agronomique d'Ilaku, district de Vatamandry. IRAM. 1960.
- ROBIN (J.) - 1967 - Premiers essais de fumure minérale et de fumure organique sur bananiers à la station de l'Ivolofna. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1195-1202.
- ROBINSON (J.B.D.) - 1961 - Nitrogen studies in a coffee soil. III the comparative efficiency of ammonia sulphate and urea fertilizers in the presence or absence of an organic mulch measured in terms of crop yield. J. Agric. Sci. 1961, 56, I, 61-64.
- ROBINSON (J.B.D.) - 1968 - Amélioration de la production agricole grâce à des engrais en Afrique orientale. Colloque d'Abidjan 1968, II, 61-68.
- ROCHE (P.) - 1967 - Contribution à l'étude du statut phosphorique des sols de Madagascar. Influence sur les problèmes de fertilité. Agronomie tropicale 1967, XXII, 3, 249-306.
- ROCHE (P.), VELLY (J.), JOLIET (E.) - 1956 - Essai de détermination des seuils de carences en potasse dans le sol et dans les plantes. Observations réalisées à la station agronomique du Lac Alaotra, Madagascar. 6ème Congrès International de la Science du Sol. Paris 1956, IV, 4, 23-30

- ROCHE (P.), VELLY (J.), JOLIET (B.) - 1959 - Utilisation du diagnostic foliaire de l'arachide dans le secteur de conservation des sols vallée-témoin, Lac Alaotra. Essai d'interprétation des analyses foliaires effectuées sur arachides de 1953 à 1957. Agronomie tropicale 1959, XIV, 2, 165-197.
- ROCHE (P.), VELY (J.) - 1961 a - Efficacité des cultures d'engrais vert dans le maintien de la fertilité de quelques types de sols de Madagascar. Agronomie tropicale 1961, XVI, I, 7-51.
- ROCHE (P.), VELY (J.) - 1961 b - Etude de quelques rotations culturales en rizières sur divers types de sol à Madagascar. Agronomie tropicale 1961, XVI, 5, 481-503.
- ROCHE (P.), VELLY (J.) - 1962 - Etude de l'évolution des éléments fertilisants apportés sur les principaux types de sols du lac Alaotra. Agronomie tropicale 1962, XVII, 10, 841-880.
- ROCHE (P.), VELLY (J.), NGO-CHAN-BANG - 1967 - Comparaison des diverses natures d'engrais azotés et phosphatés en rizière. Colloque fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1122-1126.
- ROCHE (P.), DUFOURNET (R.), RABETRANO (A.) - 1967 - Fertilisation en rizière et en culture sèche à Madagascar. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 1109-1121.
- ROCHE (P.), VELLY, CELTON (J.) - 1967 - Cheminement expérimental, méthode suivie pour l'étude du redressement de fertilité en rizière et en culture sèche à Madagascar. Colloque sur la fertilité des Sols tropicaux, Tananarive, 19-25 Nov. 1967, 331-397.
- ROGER et JUNG - 1970 - Communication personnelle.
- RONDELET (J.A.) - 1959 - Caractérisation des différentes formes de l'Aluminium et du Fer dans les sols tropicaux. IIIème Conférence Interafricaine des sols Dalaba, 1959.
- ROOSE (E.) - 1967 a - Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'Hevea en Basse Côte d'Ivoire. Document interne ORSTOM, 1967 inédit.
- ROOSE (E.) - 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 multigr. ORSTOM Abidjan 1967, 19 p. inédit.
- ROOSE (E.) - 1967 c - Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, II, 1385-1404.
- ROOSE (E.) - 1967 d - Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agronomie tropicale 1967, XXII, 2, 123-152.

- ROOSE (E.) - 1969 - Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à Cacao de moyenne Côte d'Ivoire. Station IFCC. près de Divo. Document provisoire ORSTOM 1969, à paraître.
- ROOSE (E.) - 1970 - Communication personnelle.
- ROOSE (E.), CHEROUX (M.) - 1966 - Les Sols du Bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. Cahiers ORSTOM 1966, série Pédologie, IV, 2, 51-92.
- ROOSE (E.), GODEFROY (J.) - 1968 - Lessivage des éléments fertilisants en bananeraie. Fruits, 1968, 23, II, 580-584.
- ROOSE (E.), JADIN (P.) - 1969 - Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à Cacao de Moyenne Côte d'Ivoire. Station IFCC. près de Divo. Document provisoire ORSTOM 1969, à paraître.
- ROOSE (E.), GODEFROY (J.), MULLER (M.) - 1970 - Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de Basse Côte d'Ivoire. Document provisoire 1970, à paraître.
- ROTINI (O.T.) - 1964 - Lo Zolfo in Agricoltura. 5ème Symposium International Agrochimica. Le soufre en agriculture. Palerme-Catane 16-21 Mars 1964.
- ROUZAUD (H.) - 1962 - La canne à sucre au Congo. Agronomie tropicale 1962, XVII, 7-8, 531-542.
- RUYSSEN (B.) - 1957 - La Karité au Soudan. Agronomie tropicale 1957 1957, XII, 2, 137-172.
- SAG (G.) - 1956 - Influence de l'aluminium sur le développement de l'arachide. Oléagineux 1956, II, 5, 315-322.
- SAGOT (M.), BNUFFIL (F.) - 1945 - Engrais et amendement sur l'arachide 1945. 1945, 23 p. dactylographiées.
- SAUGER (L.), GENUYT (G.) - 1949 - Un essai de fumure de l'arachide. Formule et dose d'engrais NPK. Agronomie tropicale 1949, IV, 5, 6, 301-310.
- SEERGER (J.R.) - 1961 - Effets d'une fumure azoté sur le rendement et la nodulation de l'arachide. Bulletin de l'Institut Agronomique et des Stations de recherches de Gembloux. Gembloux 1961, XXIX, 2, 197-218.
- SEGALEN (P.) - 1965 a - Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 1965, III, 2, 149-176.
- SEGALEN (P.) - 1965 b - Les sols de la zone intertropicale humide et la genèse des produits alumineux. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 1965, III, 3, 179.
- SEGALEN (P.) - 1967 - Les sols de la vallée du Noun. Cahiers ORSTOM, série Pédologie 1967, V, 3, 287-349.

- SEGALEN (P.) - 1968 - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cahiers ORSTOM, série Pédologie 1968, VI, I, 105-126.
- SEGALEN (P.), LEAL SILVA (J.N.) - 1969 - Le fer, le manganèse, l'aluminium et la silice facilement extractible dans les sols tropicaux à sesquioxides. Cahiers ORSTOM, série Pédologie 1969; VII, 3, 287-310.
- SEMENT (G.) - 1965 - Economie de l'eau du Cotonnier et irrigation à l'Office du Niger (Mali). Coton et Fibres tropicales 1965, XX, 4, 481-516.
- SILVESTRE (P.) - 1961 - Monographie des recherches conduites à Bamboey sur l'arachide. Agronomie tropicale, 1961, XVI, 6, 617-738.
- SILVESTRE (P.) - 1968 a - Recherches agronomiques relatives aux légumineuses à graines alimentaires. Colloque d'Abidjan 1968, II, 230-236.
- SILVESTRE (P.) - 1968 b - Recherches sur les plantes à tubercules. Colloque d'Abidjan 1968; II, 370-375.
- SILVESTRE (P.); SOITOUT (M.) - 1965 - Première réunion technique sur l'amélioration des légumes et des légumineuses à graines en Afrique. Agronomie Tropicale 1965, XX, 8, 747-772.
- SNOECK (J.) - 1967 a - Ombrage et engrais dans les caféiers canephora de la Côte est Malgache. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967; I, 1154-1177.
- SNOECK (J.) - 1967 b - Premiers résultats d'essais d'engrais minéraux sur caféiers canephora à Madagascar. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux Tananarive 19-25 Nov. 1967; I, 1178-1194.
- SOUBIES (L.), GADET (R.), LEMAIN (M.) - 1955 - Recherches sur l'évolution de l'urée dans les sols et son utilisation comme engrais azoté. Annales agronomiques 1955, VI.
- SOURDAT - 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. 1967, II, 1264-1265.
- SUBRAHMANYAN (R.), SAHAY (M.N.) - 1964 - Observations on nitrogen fixation by some blue green algae and remarks on its potentialities on rice culture. Proc. Indian Acad. Science, 1964; 60 B, 145-154.
- TALINEAU - 1970 - Communication personnelle.
- TARDIEU (M.), SENE (D.) - 1966 - Le haricot niabé (Vigna Unguiculata) au Sénégal. Agronomie tropicale 1966, XXI, 8, 927-933.
- TAYLOR (A.W.), LINDSAY (W.L.), HYFFMAN (E.O.), GURNEY (E.L.) - 1963 - Potassium and ammonium tarakanites, amorphous aluminium phosphate and variscites as sources of phosphate for plants. Pro. Soil Sci. Soc. Amer., Madison 1963, 27, 2, 148-151

- THEVENIN (L.), FAUCHE (J.) - 1954 - L'engrais vert au Sénégal et en zone Soudano-sahélienne. Conf. Arachide-Mil 5-13 Sept. 1954. Bull. Agro. n° 12, 86-89.
- THOMANN (Christiane) - 1963 - Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans les sols. Méthode au pyrophosphate de sodium. Cahiers ORSTOM, série pédologie 1963, 3, 43-72.
- THOMANN (Christiane) - 1964 - Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'ouest africain. Cahiers ORSTOM, série pédologie, 1964, II, 3, 43-79.
- THORNTON (I.) - 1963 - Quelques observations sur la nodulation de l'arachide en Gambia. Oléagineux 1963, 12, 781-783.
- TINKER (P.H.) - 1959 - Soils analyses and fertilizer response. Jour. of W.A.I.F.O.R. October, 52-75.
- TINKLER (P.B.H.), GUNN (J.S.) - 1962 - Fertilizer requirements of the oil palm in Commonwealth west africa. Compte rendu du XVIème Congrès International d'horticulture, Bruxelles 1962.
- TINTIGNAC (J.P.) - 1966 - L'emploi des phosphates de Thiès dans la production d'arachide au Sénégal. Oléagineux 1966, 21, 8-9, 525-530.
- TISSEAU (M.A.) - 1959 - La déficience en cuivre et en zinc chez l'ananas : le crook-neck. Fruits 1959, 14, 9, 363-367.
- TOMLINSON (T.E.) - 1957 - Charges in Sulphide containing mangrove soils on drying and their effet upon the suitability of the soil for the growth of Rice. The Empire Journal of experimental Agriculture, Oxford 1957, XXV, 98, 108-118.
- TOURTE (R.) - 1965 - Les recherches sur le travail profond des sols en zone tropicale sèche. Agronomie tropicale 1965, XX, 10, 1034-1037.
- TOURTE (R.), VIDAL (P.), JACQUINOT (L.), FAUCHE (J.), NICOU (R.) - 1964 - Bilan d'une rotation quadriennale sur sole de régénération au Sénégal. Agronomie tropicale 1964, XIX, 12, 1033-1072.
- TOURTE (R.), NICOU (R.), CHARREAU (C.), POCTHIER (G.), POULAIN (J.F.) - 1967 - La fumure minérale "étalée" au Sénégal. Comparaison avec la fumure annuelle. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive, 1967, 19-25 Nov. I, 1058-1075.
- TURC (L.) - 1953 - Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Thèse INRA. (Paris) 1953.
- VALET (S.) - 1967 a - Recherches des carences minérales des sols de l'ouest Cameroun en vases de végétation. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 341-356.

- VALLET (S.) - 1967 b - Principes d'organisation des régions naturelles en strates homogènes et son application à l'ouest du Cameroun. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 357 p.
- VELLY (J.) - 1967 - Influence de la localisation de l'azote et du phosphore en rizière sur leur absorption étudiée avec les isotopes ^{15}N et ^{32}P . Agronomie tropicale 1967, XXII, 4, 364-376.
- 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 de la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, 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. 1967, I, 916-991.
- VELLY (J.), LATRILLE (E.) - 1967 - Influence de la date d'apport de l'azote et du phosphore en rizière. Agronomie tropicale 1967, XXII, 4, 351-363.
- VENEMA (K.C.) - 1961 - Some notes regarding the nitrate and ammonia content of tropical rains and that of a number of tropical soils. International Fertilizers limited, Keizersgracht 241, Amsterdam Hollande 1961, 4, 2, 1-39 "in" Agronomie tropicale 1961, XVI, 5, 608-613.
- VERLIERE (G.) - 1966 - Valeur fertilisante de deux plantes utilisées dans les essais de paillage du caféier : *Tithonia diversifolia* et *Flemingia congesta*. Café, Cacao, Thé 1966, X, 3, 228-236.
- VERLIERE (G.) - 1967 a - Effet de trois sources d'azote sur l'évolution du sol, la nutrition minérale et le rendement du Caféier. Café, Cacao, Thé 1967, XI, 2, 139-156.
- VERLIERE (G.) - 1967 b - Evolution de la recherche sur la fertilisation en caféiculture en Côte d'Ivoire. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive 19-25 Nov. 1967, I, 803-811.
- VERLIERE (G.) - 1969 - Un essai d'engrais sur cacaoyers en Côte d'Ivoire. Café, Cacao, Thé 1969, XIII, I, 11-33.
- VERNEY (R.), WILLAIME (P.) - 1965 - Résultats des études de l'érosion sur parcelles expérimentales entreprises au Dahomey. Symposium on the maintenance and improvement of soil fertility. Khartoum 1965, 43-53.
- VIDAL (P.), BONO (M.), FAUCHE (J.) - 1962 - Influence des fumures organiques et minérales sur la production des sorghos et la qualité des récoltes. Agronomie tropicale 1962, XVII, 6, 383-388.
- VIDAL (P.), FAUCHE (J.) - 1962 - Quelques aspects de la dynamique des éléments minéraux d'un sol Dior soumis à différentes jachères. Agronomie tropicale 1962, XVII, 10, 828-840.

- VIELLEFON (J.) - 1968 - Etude des variations du pH et du rH dans les sols de Mangrove de Basso-Casamance. Association scientifique de l'ouest africain. VI Conférence biennale, section science de la terre. Communication n° 11. Abidjan 8-13 Avril 1968.
- VIZIER - 1965 - Etude agropédologique d'emplacements cotonniers au Mayo-Kébi, République du Tchad. Rapport interne ORSTOM-CFDT 1965, 63 p. cité par DABIN 1969.
- WALLACE (T.) - 1958 - Potassium uptake in relation to soil moisture. Potassium symposium, 1958, 141-147.
- WATANABE (A.) - 1954 - Nitrogen fixation. News letter 1954, 12, 13-15.
- WATANABE (A.), NISHIGAKI (S.), KONISHI (C.) - 1951 - Effect of nitrogen fixing blue green algae on the growth of rice plants. Nature (London) 1951, 168, 754-759.
- WATSON (K.A.) - 1964 - Fertilizers in northern Nigeria. Current utilisation and recommendations for their use. Sols africains 1964, IX, I, 5-20.
- WEBB (R.A.) - 1955 - A new approach to the study of the fertility of tropical soils. Sols africains 1955, III, 3, 379-391.
- WINOGRADSKY (S.) - 1949 - Microbiologie du sol. Problèmes et méthodes. 1949, Masson Edt. Paris, 861 p.
- WISHMEIER (W.H.) - 1959 - A rainfall erosion index for an universal soil loss equation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1959, 23, 246-249.
- YAMASAKI (T.) - 1964 - Le rôle des éléments minéraux. Symposium sur la nutrition minérale du riz. Institut International de recherches sur le riz. Manille Philippines 23-28 Fév. 1964.

ADDENDUM

=====

- 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.
- DABIN (B), LENEUF (N.) - 1958 - Etude de l'érosion et du ruissellement en Basse Côte d'Ivoire, Mai 1956, Mai 1958. Rapport interne mult. ORSTOM 1958, 29 p., inédit.