

Jean BOYER

**LE CALCIUM ET LE MAGNÉSIUM
DANS LES SOLS
DES RÉGIONS TROPICALES
HUMIDES ET SUB-HUMIDES**

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER



INITIATIONS - DOCUMENTATIONS TECHNIQUES

N° 35

**LE CALCIUM ET LE MAGNÉSIUM
DANS LES SOLS DES RÉGIONS
TROPICALES HUMIDES ET SUB-HUMIDES**

Jean BOYER
Directeur de Recherches
à l'O.R.S.T.O.M.

O.R.S.T.O.M.
PARIS
1978

© ORSTOM 1978
ISBN 2-7099-0494-2

PRÉFACE

Le Calcium et le Magnésium sont deux éléments importants du sol, non seulement parce que de nombreux caractères et propriétés de celui-ci dépendent de la teneur que l'un et l'autre y présentent, mais aussi parce qu'ils sont indispensables pour le développement des micro-organismes et de la végétation.

Depuis longtemps il est bien connu — cet ouvrage en donne de nombreux exemples et en expose les raisons — que la plupart des sols des régions tropicales humides ou subhumides sont faiblement pourvus en ces deux éléments, sous quelque forme que ce soit. Calcium et magnésium sont facilement entraînés dans ces sols, traversés par de fortes quantités d'eau, lorsque leur perméabilité est suffisante.

En zone tropicale aride ou semi-aride la situation est différente et les processus d'accumulation prennent une grande importance; sols à amas et nodules, à encroûtements et à croutes calcaires ou gypseuses couvrent de grandes étendues.

De tels sols et de telles organisations s'observent aussi parfois dans les régions subhumides. On peut même y observer, par place comme en Nouvelle Calédonie, des croutes de carbonate de magnésium. Les uns et les autres y sont cependant rares; ce volume n'en traite pas; le faire eût été l'alourdir. Je souhaite qu'un ouvrage ultérieur reprenne ce même problème mais dans une zone écologique plus aride et complète ainsi par l'étude de leurs accumulations ce qui est si bien exposé ici sur la libération et les entraînements des composés du calcium et du magnésium.

Monsieur Jean Boyer était particulièrement bien préparé à « construire » ce livre :

de formation, il est agronome et pédologue;

il a été de longues années en pays tropical humide, d'abord en ce qui est devenu l'Empire Centrafricain, puis au Brésil, surtout en l'Etat de Bahia où il effectue encore actuellement de longues missions;

avec moi-même il a collaboré à une mise au point bibliographique publiée par l'Académie des Sciences des U.S.A., sur les sols des régions tropicales humides et leur fertilité; il prépare actuellement une « Somme » sur la fertilité des sols des régions tropicales.

Dans l'ouvrage, aujourd'hui présenté, il expose, avec beaucoup de clarté, l'origine et les formes des composés du calcium et du magnésium dans les sols des régions étudiées, leur devenir et le rôle qu'ils y jouent.

Il envisage ensuite leurs relations avec la végétation et l'influence des équilibres qu'ils y présentent entre eux et avec d'autres éléments minéraux.

Il précise enfin, avec beaucoup de détails et d'exemples très concrets, l'effet sur le développement de diverses cultures des teneurs si variables et souvent si faibles de ces sols en ces deux éléments, et les moyens de lutter contre leur diminution, en particulier par l'emploi des amendements calciques ou magnésiens, ou calco-magnésiens.

Cet ensemble de données est fondé sur une bibliographie très poussée, sur une très large expérience, et sur les résultats d'innombrables discussions avec amis ou collègues pédologues, géochimistes, phytophysiologistes ou agronomes.

M. Jean Boyer a toujours exposé avec beaucoup de netteté les conclusions qui lui paraissent s'imposer à la suite de l'étude de chacun des problèmes abordés, pourtant bien complexes et bien difficiles. En certains cas, elles peuvent paraître encore discutables et les études doivent être poursuivies. Elles ont toujours des bases solides, sûres.

Je pense que le lecteur sera d'accord avec moi pour reconnaître tout ce que nous devons à M. Jean Boyer pour nous avoir apporté tant d'éléments et pour en avoir tiré des conclusions aussi intéressantes et utiles, sans cacher les limites et parfois les incertitudes de certaines.

G. AUBERT,

Professeur de pédologie à l'O.R.S.T.O.M.,
membre et ancien président
de l'Académie d'Agriculture de France.

AVANT-PROPOS

Cette étude sur le calcium et le magnésium dans les sols tropicaux concerne essentiellement les sols où la dynamique de ces deux éléments relève plus des mouvements *per descensum* que *per ascensum*, c'est-à-dire principalement les sols ferrallitiques, les sols podzolisés, les sols ferrugineux tropicaux, les sols bruns eutrophes, auxquels on joindra les vertisols où cette dynamique est quelque peu particulière.

Elle néglige donc les sols où les sels se concentrent dans la partie supérieure ou moyenne du profil par suite de la prédominance des phénomènes d'évaporation sur ceux qui résultent de la percolation des eaux de drainage. Dans cette catégorie se rangent les sols où calcium et magnésium s'accumulent sous forme diffuse ou sous forme de nodules, croûtes ou encroûtement, ainsi que les sols salés ou à alcalis (non lessivés) qu'ils soient ou non affectés par le gypse. Leur importance est d'ailleurs beaucoup plus manifeste en zones méditerranéenne et désertique qu'entre les tropiques où on ne les trouve que dans la frange aride et sub-aride. De tels sols posent en outre des problèmes ardues de pédogenèse pas toujours bien élucidés : par exemple, le comportement du magnésium apparaît parfois si particulier que certains auteurs auraient tendance à l'assimiler à celui du sodium, alors que partout ailleurs on parle d'un couple calcium-magnésium où ces deux éléments ont des propriétés similaires ou du moins complémentaires.

Quant aux sols hydromorphes, les problèmes relatifs au calcium et au magnésium seront plus abordés dans une optique d'utilisation par la culture, après leur mise « hors d'eau », qu'au strict point de vue du chercheur qui cherche à dégager leurs caractéristiques et leur évolution *in situ*.

Malgré ces restrictions, il semble à l'auteur que la présente étude concerne la majeure partie des sols situés entre les tropiques et certainement la plupart des terres cultivables de ces régions, puisqu'elle couvre *grosso modo* tous les sols qui reçoivent plus de 500 à 600 millimètres de précipitations annuelles.

Remerciements

L'auteur remercie la Société « La Dolomie Française » de s'être intéressée à la rédaction de ce mémoire au point d'en assumer largement les frais de publication.

Il exprime sa gratitude à M. Aubert qui a bien voulu l'aider de ses conseils et patronner cet ouvrage en le préfaçant, ainsi qu'à ses collègues de l'ORSTOM, MM. Combeau, Dabin et Lamouroux qui, outre leurs remarques pertinentes, ont su, par une attention toujours en éveil, déceler les inévitables « vices de forme ».

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Résumé en langue anglaise	13
Introduction	17
CHAPITRE PREMIER – ORIGINE DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM PRÉSENTS DANS LE SOL	21
1. La roche-mère	21
1.1. Roches et minéraux contenant calcium et magnésium	21
1.2. Devenir du calcium et du magnésium lors de l'altération des roches et au cours de la pédogenèse	24
2. Apport de calcium et de magnésium par l'atmosphère	30
2.1. Composition de l'eau de pluie	30
2.2. Origine du Ca et du Mg atmosphériques	31
2.3. Conséquences agronomiques	32
3. Apport de calcium et de magnésium par la végétation	32
3.1. Teneur en Ca et Mg de la végétation naturelle des régions tropicales	32
3.2. Recyclage annuel du Ca et du Mg contenus dans la végétation	32
3.3. Conséquences du défrichement sur les teneurs en Ca et Mg du sol	34
4. Conclusion	35
CHAPITRE II – LES FORMES DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DU SOL	37
1. Définition des principales formes du calcium et du magnésium du sol	37
2. Calcium et magnésium échangeables	37
2.1. Le complexe absorbant	37
2.2. La saturation du complexe absorbant	38
2.3. Libération du Ca et du Mg à partir du complexe absorbant ...	39
2.4. Variations saisonnières des teneurs du sol en Ca et Mg, du pH, de la capacité d'échange	40

	Pages
3. Les réserves calciques et magnésiennes	41
3.1. Importance des réserves	41
3.2. Formes des réserves	42
4. Transformation des réserves calciques et magnésiennes en éléments échangeables	43
4.1. Définition et intensité de la transformation	43
4.2. Méthodes permettant d'estimer calcium et magnésium assimilables à terme	44
4.3. Calcium labile	44
5. Fractionnement du calcium et du magnésium dans les sols tropicaux	37
6. Détermination du calcium et du magnésium totaux	37
7. Détermination du calcium et du magnésium échangeables	48
7.1. Par les acides dilués	48
7.2. Par l'acétate d'ammonium neutre et normal	48
8. Conclusion	49
CHAPITRE III – IMPORTANCE DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DU SOL POUR LES PLANTES CULTIVÉES. RÔLE DU pH	53
1. Faibles besoins élémentaires des plantes en calcium et magnésium	53
2. Rôle plastique du calcium et du magnésium	54
3. Rôle physiologique du calcium et du magnésium	55
3.1. Le calcium	55
3.2. Le magnésium	56
3.3. Equilibres cationiques chez les plantes	56
4. Importance quantitative de la mobilisation du calcium et du magnésium du sol par les plantes cultivées	57
4.1. Le développement du végétal et le rendement	58
4.2. Les teneurs en éléments minéraux du sol et la fumure	58
4.3. L'âge de la plante	62
5. Quelques troubles physiologiques dus à une carence ou un excès de calcium et de magnésium	64
5.1. Carences en magnésium	64
5.2. Carences en calcium	65
5.3. Excès de calcium	65
5.4. Excès de magnésium	65
6. Le pH du sol et les rendements des cultures	65
6.1. Influence du pH du sol sur les rendements	66
6.2. Causes de l'action du pH sur les rendements	67
7. Conclusion	70

CHAPITRE IV – LES ÉQUILIBRES ENTRE ÉLÉMENTS MINÉRAUX DU SOL OÙ INTERVIENNENT CALCIUM ET MAGNÉSIUM. ANTAGONISMES ET SYNERGIES	71
1. Introduction	71
2. Conditions expérimentales	73
3. Antagonisme calcium-magnésium et rapport Ca/Mg	74
3.1. Valeur optimale du rapport Ca/Mg	74
3.2. Valeur minimale du rapport Ca/Mg	74
3.3. Valeur maximale du rapport Ca/Mg	75
3.4. Le rapport Ca/Mg et les plantes annuelles	75
3.5. Le rapport Ca/Mg et la structure du sol	76
4. Antagonisme magnésium-potassium et rapport Mg/K	76
4.1. Valeurs-limite du rapport Mg/K du sol admissibles pour certaines cultures	77
4.2. Valeurs optimales du rapport Mg/K	78
5. Equilibres calcium-potassium : antagonisme ou synergie ?	79
5.1. Quelques valeurs du rapport Ca/K	79
5.2. Antagonisme ou synergie calcium-potassium	79
6. Equilibre global calcium-magnésium-potassium. Le rapport Ca + Mg/K	80
7. Balances cationiques dans le sol	82
8. Synergies du calcium et du magnésium avec le phosphore et l'azote	83
8.1. Interaction calcium-phosphore ou synergie indirecte ?	83
8.2. Synergie magnésium-phosphore	84
8.3. Effets synergétiques du calcium et du magnésium avec l'azote du sol	84
9. Synergies et antagonismes du calcium et du magnésium avec les oligo-éléments	85
9.1. Rôle du pH	85
9.2. Antagonisme calcium-aluminium	85
9.3. Antagonisme du Ca et du Mg avec le manganèse	85
9.4. Synergie calcium-molybdène	86
10. Conclusion	86
 CHAPITRE V – LES TENEURS EN CALCIUM ET MAGNÉSIUM DU SOL COMPATIBLES AVEC LES CULTURES	 89
1. Introduction	89
2. Seuils de carence et de déficience pour le magnésium	90
2.1. Variabilité des teneurs-limites en magnésium échangeable suivant les auteurs	90

	Pages
2.2. Définition des seuils de carence et de déficience	90
2.3. Importance de la teneur en éléments fins du sol sur les valeurs des seuils de carence et de déficience en magnésium échangeable	92
3. Teneurs-limites et teneurs optimales en calcium	93
3.1. Faiblesse des besoins élémentaires en calcium	93
3.2. Importance du taux de saturation du complexe absorbant	93
3.3. Valeurs optimales de la teneur du sol en calcium échangeable pour certaines plantes	94
3.4. Cas particulier des légumineuses : arachide, soja	95
4. Echelles de fertilité faisant intervenir le calcium et le magnésium	96
4.1. Echelles de fertilité pour le magnésium seul	96
4.2. Echelles de fertilité où interviennent calcium et magnésium soit séparément soit inclus dans la somme des bases échangeables ..	97
4.3. Echelles de fertilité faisant intervenir la somme des bases échan- geables et la teneur du sol en éléments fins (0-20 microns)	98
5. Un facteur synthétique d'appréciation de la fertilité des sols : le pH	99
6. Conclusion	102
CHAPITRE VI – LIXIVIATION DU CALCIUM ET DU MAGNÉ- SIUM	
	103
1. Susceptibilité à la lixiviation du calcium et du magnésium.....	103
1.1. Susceptibilité par rapport aux nutriments N, P, K	103
1.2. Susceptibilité comparée du calcium et du magnésium	104
1.3. Influence de la végétation sur les susceptibilités relatives du calcium et du magnésium à la lixiviation	105
2. Les facteurs de la lixiviation	105
2.1. Le drainage	105
2.2. La couverture végétale	106
2.3. Le paillis et les couvertures mortes	107
2.4. Les teneurs du sol en Ca et Mg	108
3. Lixiviation des apports de calcium et de magnésium au sol	109
3.1. Les cendres végétales	109
3.2. Les amendements calco-magnésiens	111
4. Acidification du sol par les engrais minéraux	114
4.1. Le sulfate d'ammoniac	114
4.2. Les nitrates et l'urée	115
4.3. Les autres engrais minéraux	116
4.4. Discussion	117
5. Conclusion. Intensité comparée de la lixiviation en pays tropicaux et en pays tempérés	117

CHAPITRE VII – L'APPAUVRISSMENT GLOBAL EN CALCIUM ET MAGNÉSIUM DES SOLS CULTIVÉS, IMPORTANCE DE L'ÉROSION ET DES EXPORTATIONS. QUELQUES PALLIATIFS		121
1. Causes des pertes en calcium et magnésium sous cultures, autres que la lixiviation		121
1.1. L'érosion		121
1.2. Les exportations par les récoltes		122
2. Quelques essais de bilans du calcium et du magnésium dans les sols tropicaux		122
2.1. Cas des cultures traditionnelles de Casamance		122
2.2. Cas de la culture arachidière au Sénégal		123
2.3. Cas des rotations culturales du centre de la Côte d'Ivoire (Bouaké)		125
2.4. Bilan du calcium et du magnésium sous cultures fourragères dans le sud de la Côte d'Ivoire		127
2.5. Diminution des bases échangeables des sols sous plantations de cacaoyers		128
3. Procédés agronomiques destinés à réduire ou à compenser la lixiviation du calcium et du magnésium		129
3.1. Les systèmes culturaux traditionnels		129
3.2. Quelques procédés de conservation de la fertilité du sol en culture intensive et semi intensive		130
3.3. Enrichissement du sol en calcium et magnésium autrement que par les amendements calco-magnésiens minéraux		131
4. Conclusion		134
CHAPITRE VIII – LES AMENDEMENTS MINÉRAUX CALCIQUES, MAGNÉSIENS ET CALCO-MAGNÉSIENS		135
1. Introduction		135
2. Objectifs, effets favorables et défavorables sur le sol des amendements calciques et magnésiens		136
2.1. Teneurs du sol en calcium et magnésium inférieures aux seuils admissibles		136
2.2. Toxicités aluminiques et manganiques		137
2.3. Assimilabilité du phosphore du sol		138
2.4. Fourniture d'azote aux cultures		138
2.5. Structure du sol		139
2.6. Matière organique		139
2.7. Assimilabilité des oligo-éléments		139
2.8. Le potassium du sol et des engrais		140
2.9. Le magnésium		140
3. Formes des amendements calciques et magnésiens		141
3.1. Les amendements purement magnésiens		141
3.2. Le gypse		141
3.3. Les composés phosphatés du calcium		141
3.4. Le calcaire et la dolomie		143

	Pages
4. Calcul des doses d'amendements calciques et calco-magnésiens ..	145
4.1. Calcul basé sur la correction du pH du sol	145
4.2. Calcul basé sur l'acidité d'échange	146
4.3. Calcul basé sur le pH « tamponné » du sol (Buffer pH).....	146
4.4. Calcul basé sur l'aluminium échangeable	147
4.5. Quelle méthode choisir ?	148
5. Fixation difficile du calcium et du magnésium des amendements sur le complexe absorbant	148
6. Conclusion : la pratique du chaulage	149
6.1. Objectifs recherchés	149
6.2. Quand faut-il chauler ?	149
6.3. Amendement de fond et d'entretien	150
Conclusion générale	153
Bibliographie	157

ABSTRACT

CALCIUM AND MAGNESIUM IN SOILS OF HUMID AND SEMI-HUMID TROPICS

Chapter I. — Origin of soil calcium and magnesium

This chapter reviews the three main sources of calcium and magnesium in soils:

1) Parent material. Many rocks and minerals contain calcium and magnesium at various rates according to their nature, among sedimentary, plutonic and metamorphic rocks. In spite of very high losses (99 per cent of original content for Ca and Mg) occurring in the first phase of soil formation, parent material is usually considered as the main source of exchangeable bases at a degree depending on primitive concentration in rocks. This point of view appears defensible below 1,700 mm annual rainfall; it seems wrong above 1,700 mm. However this may suffer exceptions.

2) Rainfall. Small, but not negligible, amounts of calcium and magnesium are brought to the soil by rainfall. Data recording annual calcium and magnesium in rainwater are given in tabular form for tropical and temperate countries.

3) Vegetation. Clearing and burning natural vegetation bring to the superficial layers of the soil various amounts of calcium and magnesium according to the type of vegetal cover. For tropical ombrophilous forests, the soil exchangeable calcium and magnesium can possibly be multiplied by 6 and 3 respectively. For savannahs, these amounts are fairly smaller. Some tables give data from various authors concerning the calcium and magnesium content of natural vegetation and the homologous amounts in soil after burning.

Chapter II. — Status of calcium and magnesium in soils

Calcium and magnesium are mainly considered from the point of view of their exchangeable and non-exchangeable forms.

1) Cation exchange capacity in tropical soils is usually low; in most cases this is due to a predominance of kaolinite clay. Exceptions do occur when allophane, illite or montmorillonite appear in appreciable amounts.

Organic matter increases strongly the exchange capacity in the upper horizon.

2) Saturation of the soil exchange complex by calcium (and magnesium) is rather variable: for example, it varies from 90 to 1 per cent in ferrallitic soils (oxisols, many ultisols, some inceptisols of American Soil Taxonomy). Strong calcium desaturation occurrence is rather high under humid conditions. In most cases exchangeable calcium and magnesium amount to 70-95 per cent of the exchangeable bases.

3) Non exchangeable magnesium is usually high in tropical soils compared to its exchangeable form. On the opposite, non exchangeable calcium is low compared to the exchangeable calcium. Tables give analytic data.

4) A few data are available about transformation of non-exchangeable into exchangeable calcium and magnesium. However, it appears that non-exchangeable calcium is more easily and rapidly available for plants than non-exchangeable magnesium and that it disappears more quickly under cultivation.

Chapter III. — Importance of calcium and magnesium for cultivated plants. Role of pH

Several reports on plant physiology show that calcium and magnesium are needed as constituents of some organic compounds (pectins, chlorophyl...). However, the amounts considered are very small.

On the other side, important concentrations of calcium and magnesium are needed in cell solutions to insure cell growth, formation and move of carbohydrated and phosphorous molecules, chlorophyllian function, etc.

Calcium and magnesium play an important role in the plant by helping to secure the ionic equilibriums between the various cations. A dependence of the equilibrium in the plant on the equilibrium in the soil can possibly be ascertained outside a given range of value, due to selectivity processes in plant organism (see chapter IV for soil equilibriums).

Finally, soil calcium and magnesium influence many soil properties: among others, pH can be of some help in estimating nitrogen and phosphorus availability, aluminium and manganese toxicity and the degree of complex saturation by bases.

Chapter IV. — Equilibriums between soil chemical elements in which calcium and magnesium are concerned. Antagonism and synergy

In this chapter dealing with equilibriums between soil chemical elements, in which calcium and magnesium are concerned, the author tries to approach, through existing agronomical litterature, the dependence and interdependance between calcium and magnesium and between these two elements and others, such as potassium, nitrogen, phosphorus, aluminium, manganese, copper, zinc, molybdenum.

It appears that :

1) Between calcium, magnesium and potassium (given in milliequivalent/100 g of soil) :

- the Ca/Mg ratio can vary from 1 to a very high value, ranging possibly between 10 and 40, according to plant species and without trouble for the concerned plant. The optimum often ranges between 2 and 10;
- the Mg/K ratio optimum for many plants seems to be situated around 3 and 4. Limits of adequacy may largely vary according to clay and silt content, exchangeable magnesium rate and individual needs of plant species;
- the Ca/K ratio shows limits of adequacy appearing to lie between 4-6 and 12-17;
- the Ca + Mg/K ratio, which is under the dependance of the previous ratios is usually adequate between 15 (average value) and 25-35, for many plants, possibly 40-50 for some species.

2) Antagonism and synergy with other elements.

Calcium (and also magnesium) increases availability of soil phosphorus nitrogen and molybdenum and decreases assimilability of aluminium, manganese, copper zinc and iron. These actions are either bound to antagonistic and synergetic phenomenas or influenced by pH. Anyway it is not easy to distinguish them. In spite of the variability affecting these ratios, it is recommended to be attentive to the soil equilibriums especially when fertilizers are used.

Chapter V. — Soil exchangeable calcium and magnesium and needs of cultivated plants. Fertility scales

Cultivated plants have reduced needs in soil calcium and magnesium. For exchangeable magnesium only, it is possible to define two thresholds: the first one is at 0.10-0.17 meq/100 g of soil exchangeable magnesium and corresponds to appearance of severe Mg deficiency on crops; the second one at 0.25 - 0.35 meq/100 g of exchangeable magnesium is the upper limit for response to magnesium fertilizers.

Concerning calcium, plants often appear more sensitive to properties given to soil by exchangeable calcium than to calcium content "sensu stricto". This sensibility varies according to plant species. Acid-tolerant plants as rubber-trees, tea-bush, pine-apple, ..., don't suffer, and even prefer, low levels of exchangeable calcium. Many plants, and among them many food crops, do appreciate high cationic contents.

Through examples given, it seems that 2 to 3 meq/100 g of exchangeable bases are needed in many kaolinitic soils to obtain good yields, these value can vary a little with clay and silt content. pH gives a satisfactory approach to estimate soil fertility. Legumes prefer neutral or weakly acid pH as well as sufficient exchangeable calcium (1.5 and 3 meq/100 g appear as inferior limits respectively for peanuts and soybeans).

Chapter VI. — Leaching of calcium and magnesium in soils

Soil calcium and magnesium are very sensitive to leaching. Intensity of leaching depends on water drainage and on soil calcium and magnesium content; it can be increased by insufficient vegetal cover (except when soil permeability decreases) and chemical fertilizers, mainly nitrogenous fertilizers. Tables present data of Ca-Mg leaching in soils under the influence of rainfall, original content of exchangeable bases, supply of calcium and magnesium to the soil by ashes (after burning vegetation) and calcareous and dolomitic fertilizers.

Moreover, comparisons are made between leaching in temperate and tropical countries.

Chapter VII. — Decrease of soil calcium and magnesium under cultivation. Influence of erosion and exportations by crops. Some means to prevent or reduce this decrease

Leaching is not the only factor of calcium and magnesium decrease in cultivated soils. It is also necessary to consider erosion and exportations by crops.

Concerning erosion, it is possible, but never easy, to stop it.

Calcium and magnesium crop exports are usually smaller than the quantity relevant to leaching and erosion. They may be reduced by burying every crop residue.

Organic manure and mulch are adequate to reestablish or preserve soil calcium and magnesium but they are scarcely used in the tropics.

Fallow is an efficient mean to restore convenient levels of soil exchangeable calcium and magnesium. However, present evolution of tropical agriculture tends to reduce its length and therefore its efficiency.

Consequently, it appears that mineral calcic and magnesium fertilizers will be more and more used in the future.

Chapter VIII. — Use of magnesian, calcic and calco-magnesian fertilizers.
Liming processes

Purpose of magnesian, calcic and calcic-magnesian fertilizers are the following :

- to correct magnesium and calcium deficiencies in crops : even calcium deficiencies occur rarely,
- to prevent or eliminate aluminium and manganese toxicity in soil,
- to improve nitrogen and phosphorus supply to cultivated plants.

These conditions are usually fulfilled when pH ranges between 5.0 - 5.2/7.0 - 7.5 and, in any case, when pH is equal or greater than 5.5 (except for acid-tolerant plants).

In cultivated soils with pH ranging between 5.5 and 7.0, it would be sufficient to balance calcium and magnesium losses by a light supply in order to maintain the original soil properties.

However, farmers and agronomists usually let calcium and magnesium contents decrease to the lowest limit compatible with cultivation.

In acid soils (pH less than 5.5), it is often necessary to make heavy liming in order to rise the pH and to prevent aluminium toxicity. This type of fertilization is subject to an important leaching, so that it must be carried on again some years later.

In order to minimize leaching, and to spare money, the best way, sometimes, consist in supplying a small quantity of calcium every year.

Various types of mineral calcium and magnesium fertilizers are reviewed as well as liming processes. Some difficulties encountered, such as "chemical barrier" in deep horizons of acid soils, are mentioned.

« (*Agricultura*) *Primum, inquit, non modo est ars, sed etiam necessaria ac magna. Eaue est scientia quae docet quae sint in quoquo agro serunda ac faciunda quaeque terra maximos perpetuo reddat fructus* ».

VARRON, « *Rerum rusticarum de Agricultura* »,
Livre I, Chap. IX.

INTRODUCTION

Les jugements et opinions sur les potentialités agricoles des sols des régions tropicales furent et sont encore très divers.

La luxuriance de la végétation de leurs zones humides a tout d'abord laissé supposer une fertilité importante, inépuisable même. Et puis, on s'est aperçu très vite qu'après quelques années ou une dizaine d'années de culture continue, beaucoup de sols ne donnaient plus que de maigres récoltes, même si d'autres, principalement dérivés de roches volcaniques, continuaient à produire de façon honorable.

Ce phénomène, bien mis en évidence par les agronomes qui ont suivi les différentes vagues de colonisation européenne en Amérique du sud, Extrême-Orient et Afrique, n'est pas particulier au mode d'exploitation de la terre par des étrangers, puisque l'on pense, avec quelques bonnes raisons à l'appui, que la disparition de la civilisation Maya est au moins partiellement due à l'épuisement des terres cultivées.

On formulait, pendant la première moitié du 20^e siècle, les réserves les plus expresses sur la fertilité des sols tropicaux et surtout sur la possibilité de leur faire produire nettement plus que la subsistance des populations locales.

Actuellement, aidée en cela par le progrès des connaissances sur ces sols, une génération d'agronomes dont les vues sont plus celles de bio-physiciens que d'agriculteurs praticiens, voit dans les pays de la ceinture intertropicale du globe le futur grenier de l'humanité, essentiellement grâce à des considérations climatiques : ensoleillement, chaleur, humidité n'y sont-ils pas bien plus favorables à la pousse des plantes que partout ailleurs sur la Terre ? Même les régions tropicales semi-arides bénéficient d'un préjugé favorable, sous condition, bien sûr, d'y apporter de l'eau. Ne peut-on pas techniquement y faire deux et même trois récoltes par an au lieu d'une dans les pays tempérés toujours frappés par la malédiction de Déméter (1) ?

Et pourtant, de nos jours, ce sont ces agricultures tempérées, pourtant handicapées par le climat, qui se montrent souvent les plus productives et surtout les plus « plastiques », pouvant faire varier, presque à volonté, le volume et la qualité des produits récoltés.

(1) Selon l'une des plus émouvantes légendes de la mythologie grecque Déméter (Cérès pour les latins), déesse des moissons, inconsolable de l'enlèvement de sa fille Perséphone par Hadès, dieu des enfers, qui en fit son épouse, négligea à tel point ses fonctions que la terre devint stérile. Alarmé, Zeus ordonna à Perséphone de partager l'année entre sa mère et son mari; d'ou six mois pendant lesquels Déméter, radieuse, transmet sa joie de vivre à la nature, et six mois où la déesse replongée dans son chagrin, laisse les plantes sans vie ou sans force.

Aussi paraît-il intéressant de faire un retour en arrière, à la recherche du temps, sinon « perdu », du moins passé.

Déjà dans l'antiquité, on se préoccupait de la « fatigue », du « vieillissement » des terres trop intensément cultivées ; les agronomes latins, comme Caton l'ancien, Varron, Columelle, s'ils différaient sur l'interprétation à donner à ce phénomène, n'en étaient pas moins tous d'accord pour préconiser les mêmes remèdes : fumier de ferme, compost de débris végétaux de toute sorte, et même parfois cultures de légumineuses (Columelle, livre II, Chap. IV).

De fait, l'agriculture de l'Europe Occidentale s'est développée dans le contexte d'une civilisation essentiellement rurale, avec consommation sur place de la majeure partie des produits récoltés et restitution au sol de tous les déchets de récolte principalement sous forme de fumier ; au besoin on allait chercher sur les friches et dans les forêts les matières végétales nécessaires à la fabrication de ce fumier et à la bonification des sols mis en culture (2). L'une des faveurs féodales, puis royales, les plus prisées des paysans n'était-elle pas l'autorisation de ramasser dans les forêts la litière des feuilles en décomposition ?

On constatait empiriquement l'effet favorable de ces pratiques sans en connaître exactement la cause.

Et pourtant en 1563, Bernard Palissy faisait preuve de vues prophétiques, qui nous paraissent impensables étant donné les connaissances scientifiques de l'époque, en écrivant ces lignes « il faut que tu me confesses que, quand tu apportes le fumier au champ, que c'est pour lui rebailler une partie de qui lui a été osté... Or ladite herbe, estant bruslée, se réduit en pierre de sel, lequel sel, des apothicaires et philosophes alchimistes appellent « sal alcaly »... N'as-tu pas vu certains laboureurs que, quand ils veulent semer une terre deux années suivantes, ils font brusler le gley ou paille restée du blé, et en la cendre de ladite paille sera trouvé le sel que la paille avait attiré, lequel sel, demeurant dans le champ, aidera derechef à la terre ».

La bonification par le marnage des terres, que maintenant nous qualifierions d'acides, était alors une pratique déjà connue ; Bernard Palissy et Olivier de Serres y font référence et la recommandent vivement dès que le besoin s'en fait sentir.

Au milieu du 18^e siècle, le gentilhomme agronome qu'était le marquis de Turbilly publia un traité des défrichements qui eut un immense retentissement ; il y a codifié en particulier les techniques de l'écobuage et du chaulage (n'avait-il pas construit en Anjou, sur ses terres, un four à chaux ?). Dans toutes les sociétés savantes de naturalistes (et tout scientifique l'était peu ou prou à ce moment-là), on discutait ferme de la valeur relative des amendements : chaux, marnes, tangles (3), goémons, gadoues.

Coïncidence heureuse : au cours de ce même 18^e siècle les découvertes de chimie fondamentale se multiplièrent ; après Brand qui isola le phosphore à Hanovre en 1699, on fit la distinction entre soude et potasse en 1746 (Brand), on définît la composition du gypse en 1747 (Macquer), puis celle du carbonate de calcium et du carbonate de magnésie (Black). Mais il fallut Lavoisier, aidé de Guyton de Morveau pour mettre un peu d'ordre dans tout cela par une nouvelle nomenclature chimique qui introduisait et précisait la notion de corps simples.

(2) Jusqu'à une date récente, on récoltait, en France, les ajoncs des landes de la Bretagne et les fougères des pentes du pays basque, qui après avoir servi de litière aux animaux étaient épanchés dans les champs... L'enchérissement du coût de la main-d'œuvre paysanne a pratiquement fait disparaître ces pratiques. Toutefois on continue de ramasser, assez souvent, le goémon sur les côtes.

(3) Boue calcaire mêlée de tests de polyptiers et de coquilles que l'on retire de la mer sur la côte sud de la Manche (Cotentin et Bretagne).

A sa mort (1794), l'outil scientifique était prêt. Mais pour l'utiliser avec fruits, il fallait convaincre les esprits. Malgré les expériences de Glauber qui, vers 1650, montra que le salpêtre était un élément fertilisant, celles de John Woodward publiées en 1699 démontrant que des menthes poussaient d'autant mieux dans l'eau que celle-ci était plus impure, on était toujours obnubilé par les affirmations de Van Helmont et de Boyle (première moitié du 17^e siècle) pour lesquels l'eau suffisait à la nutrition des plantes. Au mieux parlait-on de « matière végétale de la terre », de « sucs de la terre ». On approchait toutefois de conceptions plus réalistes avec Jethro Bull pour lequel de « minuscules particules détachées de la terre » contribuent essentiellement à la nourriture des plantes.

Ce fut l'œuvre des grands agronomes de la première moitié du 19^e siècle, Théodore de Saussure et surtout Boussingault, surnommé le « père de la chimie agricole » par Sir Edward Russel, de démontrer scientifiquement que les plantes absorbent leurs sels minéraux à partir du sol et ne les fabriquent pas. Mais il fallut, en 1840, l'ironie mordante de Liebig pour imposer définitivement cette conception ; ce dernier établit également la liste des constituants nécessaires aux plantes, parmi lesquels on trouve le calcium et le magnésium.

La voie était ouverte, où s'engouffrèrent en particulier les anglais Lawes et Gilbert, les français Ville, de Gasparin, Schloesing père et fils, puis leurs élèves et successeurs.

Bien que l'on se soit occupé en premier lieu de la triade azote, phosphore et potassium, Schloesing mit en relief entre 1860 et 1870 les propriétés floculantes du calcium sur l'argile colloïdale ; il calcula, ainsi que de Gasparin, les quantités de chaux (CaO) que le sol doit contenir, et attira l'attention sur la dynamique de cet élément : chaque récolte prélève en moyenne 150 kilogrammes de chaux par hectare tandis que les eaux de pluies entraînent 450 kg, soit une perte annuelle de 600 kg/ha.

De ses travaux et de ceux de ses successeurs dérivent les conceptions modernes sur les amendements calcaires, parfois interprétées avec exagération, surtout au début du siècle actuel.

Sans doute parce que tout calcaire contient toujours un peu de magnésie, le magnésium paraît un oublié dans ce grand foisonnement de découvertes suivies d'applications pratiques. Malgré Liebig, malgré de Gasparin qui en 1860 écrivait : « Dans les végétaux, la magnésie, se trouve là au même titre que les autres substances fertilisantes et son importance n'est pas moindre », on ne s'en préoccupait que de manière accessoire dès qu'il s'agissait du sol (et pourtant de Gasparin fut ministre de l'Agriculture !). Il fallut attendre la fin du siècle et les travaux de l'école allemande, avec en particulier Loew et Jacob, pour lui attribuer la place qui lui revient.

Dans ce profond bouleversement des connaissances agricoles, il n'est guère étonnant de trouver un absent de marque : l'agriculture tropicale. En raison du contexte historique de l'époque, seuls les Etats-Unis, dont la frange subtropicale est importante, eussent pu s'y intéresser ; mais préoccupés par le peuplement et la mise en valeur de leurs immensités vides, empêtrés dans la guerre de Secession et ses conséquences, ils ne l'ont guère fait qu'à l'aube du 20^e siècle, mais avec la rapidité et l'efficacité qu'on leur connaît.

Vers la fin du 19^e siècle, l'Europe créa des empires coloniaux en Asie et en Afrique ; les agronomes européens y exportèrent leurs connaissances, les adaptèrent à ce nouveau milieu et les perfectionnèrent. Le mouvement commença de façon effective après la première guerre mondiale et s'amplifia après la seconde, tandis que les Etats-Unis d'Amérique affirmaient une sorte de « leadership » intellectuel sur l'Amérique latine.

On s'intéressa évidemment beaucoup aux suppléments de récolte que l'on pouvait obtenir par les fumures azotées, phosphoriques et potassiques, mais l'on se heurta à un obstacle dont l'importance ne se fit jour que petit à petit, à savoir la pauvreté assez générale des sols tropicaux en calcium et en magnésium et la réaction acide des terres qui en découle.

Ce sera le but de cet ouvrage d'essayer de faire une sorte de bilan des connaissances acquises sur le calcium et le magnésium en milieu tropical, l'origine de ces éléments dans les sols, leur importance pour le sol et les plantes, les quantités et les proportions requises pour une agriculture productive, leur dynamique et enfin la correction des carences et déficiences.

CHAPITRE PREMIER

Origine du calcium et du magnésium présents dans le sol

1. — LA ROCHE-MERE

1.1. Les roches et minéraux contenant calcium et magnésium

Afin de fixer les idées, on va s'efforcer de passer ici une rapide revue des roches et des minéraux présents dans ces roches, tout au moins de celles et de ceux qui peuvent fournir calcium et magnésium aux sols formés à partir de leurs produits d'altération.

Les roches sédimentaires

Les deux roches les plus importantes en ce qui concerne notre propos sont incontestablement le *calcaire* et la *dolomie* formés respectivement pour l'essentiel de calcite (carbonate de calcium CO_3Ca) et de dolomite (carbonate double de calcium et de magnésium $\text{CO}_3\text{Ca} - \text{CO}_3\text{Mg}$).

En fait, il est relativement rare de trouver dans la nature un calcaire ou une dolomie parfaitement purs; calcite et dolomite existent souvent en mélange dans les roches auxquelles on a donné les noms suivants en fonction du pourcentage de dolomite (Jung, 1958) :

– calcaires	0 à 5 % de dolomite
– calcaires magnésiens	5 à 10 % de dolomite
– calcaires dolomitiques	10 à 50 % de dolomite
– dolomies calcarifères	50 à 90 % de dolomite
– dolomié	90 à 100 % de dolomite

En outre, ces roches contiennent toujours une certaine quantité d'« impurétés » : grains de quartz, argiles, oxydes et fer, micas, etc...; cela peut aller du calcaire corallien, formé exclusivement de calcite (souvent dolomitisée), aux calcaires marneux où le minéral secondaire est une argile, ou encore au loess où des « poupées » et des grains calcaires sont épars dans le limon argileux.

Beaucoup de calcaires et de dolomies courants ne contiennent qu'un faible pourcentage d'impuretés (par exemple de l'ordre de 1 % pour la craie) mais qui ont malgré tout une importance considérable pour la formation des sols.

Parmi les *calcaires* dits *impurs*, on peut citer les calcaires gréseux, feldspathiques, pélitiques et surtout les argiles calcaires, marnes, molasses, etc., les distinctions entre appellations étant basées sur la teneur en carbonate de calcium (Jung, 1958).

- calcaires	95 à 100 % de calcite
- calcaires argileux	65 à 95 % de calcite
- marnes	35 à 65 % de calcite
- argiles calcaires	5 à 35 % de calcite
- argiles	0 à 5 % de calcite

On peut ajouter que certains grès ont un ciment calcaire.

Il existe d'autres roches sédimentaires contenant du calcium et généralement aussi un peu de magnésium comme les *phosphates tricalciques*; ces derniers contiennent, à l'état naturel, une forte proportion d'impuretés, (30 % pour les phosphates du Maroc), mais, purifiés pour usage agricole, ils ont souvent 40 à 50 % de CaO et 1 à 5 % de MgO (pourcentages variables suivant l'origine de ces phosphates).

Les roches éruptives

On rassemble ici sous ce vocable et les roches plutoniques bien cristallisées formées en profondeur et les roches effusives (laves) dont la masse reste vitreuse, totalement ou partiellement.

On peut les classer suivant 2 séries parallèles en fonction des teneurs croissantes en fer, calcium et magnésium.

TABLEAU I.1

Pôle acide (silicique)	1	Roches plutoniques	Roches effusives
		Granites et syénites alcalines Syénites néphélieniques alcalines	Rhyolites alcalines et trachytes alcalins Phénolites alcalines
Teneur croissante en fer	2	Granites et syénites calco-alcalines Syénites néphéliniques calco-alcalines. Granodiorites	Rhyolites calco-alcalines et trachytes calco-alcalins Phonolites calco-alcalines
	3	Diorites quartziques et diorite sans quartz Essexites	Dacites (avec quartz) et andésites (sans quartz) Tephrites
	4	Diorites quartzifères Deorites et gabbros sans quartz Théralites	Sakalavites (avec quartz) et basaltes (sans quartz) Basanites
	5	Melagabbros	Ankaramites et océanites
Pôle basique (ferro- magnésien)	6	Péridotites	

D'une façon un peu trop didactique pour être exacte, tout au moins dans le détail, on peut dire que la richesse des roches éruptives en calcium et magnésium croît en même temps que la teneur en fer, qui augmente constamment si l'on passe de la case 1 aux cases 5 et 6; d'où également l'adage: « plus une roche est sombre, plus elle est riche en calcium et magnésium », adage qui se révèle d'ailleurs faux si on arrive au pôle « ferro-magnésien » du tableau I.1, les péridots étant par définition dépourvus de calcium. Calcium et magnésium sont typiquement fort mal représentés dans les roches de l'entrée 1 (pôle acide).

Ils apparaissent dès l'entrée 2 avec la présence d'un plagioclase du type oligoclase (les plagioclases sont considérés comme un mélange d'albite 6SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O et d'anorthite $2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaO}$, et l'oligoclase contient entre 10 et 30 % de ce dernier composant) et d'un mica, la biotite ($\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}$) $\text{Mg}(\text{OH})\text{K}$, avec en plus au pôle alcalin de cette catégorie (granodiorite) des amphiboles, fréquemment de la hornblende ($\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}$) Ca_2 (FeMg) $_4\text{Al}$ (OH) $_2\text{Na}$, et parfois des pyroxènes dont le plus commun est le diopside (Si_2O_6) CaMg .

Calcium et magnésium deviennent de plus en plus abondants dans les entrées 3, 4 puis 5. Non seulement parce que les plagioclases, andésite, labrador, bytownite, deviennent de plus en plus riches en calcium, mais aussi grâce à la présence en abondance d'amphiboles, type hornblende en particulier, et de pyroxènes surtout dont l'un des plus fréquents est l'augite (SiAlO_6) Ca (FeMgAl). Toutefois le calcium a tendance à diminuer en proportion si on approche du pôle basique de ces roches où des minéraux purement ferro-magnésiens peuvent tenir une place prépondérante, tels l'olivine (SiO_4) (FeMg) $_2$ et l'hypersthène (Si_2O_6) (Fe,Mg) $_2$.

Enfin, la catégorie 6 ne comporte plus typiquement que des minéraux ferro-magnésiens du genre olivine (SiO_4) (FeMg) $_2$, riches en magnésium, mais sans calcium, au moins en principe.

Les roches métamorphiques

Les transformations pétrographiques dues au métamorphisme n'affectent généralement pas de façon radicale la composition minéralogique des roches (Jung, 1958).

- les calcaires et les dolomies, suivant leur pureté, donnent des marbres purs ou à minéraux;
- les marnes: des micaschistes calcifères puis des amphibolites et pyroxénites (suivant l'intensité du métamorphisme);
- les basaltes et gabbros: des praxinites, puis des amphibolites et pyroxénites;
- les granites et schistes peu calcifères: des micaschistes, puis des gneiss et leptynites, où le principal minéral magnésien est la biotite, tandis que le calcium, ici faiblement représenté, peut être contenu dans les grenats en particulier.

On assiste, toutefois, au remplacement du calcium par du sodium dans les amphiboles. Ce phénomène, mal expliqué, se remarque en particulier lors des transformations par métamorphisme intense des roches relativement mal fournies en calcium au départ, tels que granites, rhyolites, schistes, les termes ultimes de la transformation, leptynites, migmatites, étant en général appauvris en calcium et enrichis en sodium par rapport à la composition (supposée) des roches sédimentaires ou éruptives qui leur ont donné naissance (Jung, 1958).

Diversité de la composition des roches

L'inconvénient de toute classification d'objets naturels suivant des règles précises est de fournir un schéma commode, à fort relent didactique, de

rangement de ces objets, ici des roches, satisfaisant pour l'esprit, mais qui rend mal compte de l'infinie diversité que l'on trouve dans la nature.

Une roche ne reste pas homogène sur tout un gisement : un granite, alcalin ici, peut passer au calco-alcalin quelques mètres plus loin, puis présenter une faille où se seront accumulés des produits variés d'origine hydrothermale etc. Il n'y a pas plus de stabilité dans les compositions chimiques des minéraux; leurs édifices cristallins subissent souvent des transformations secondaires : le magnésium remplace partiellement le calcium dans les calcaires coralliens et il peut se substituer dans une certaine mesure à l'aluminium dans le réseau de la muscovite qui en arrive à contenir jusqu'à 17 % de Mg (Salmon, 1963); l'orthose contient très généralement un peu de fer qui lui donne sa couleur rose si fréquente.

De telle sorte que la nature pétrographique des roches, telle qu'on peut la déduire des cartes géologiques, ne donne qu'une indication sur leur richesse ou leur pauvreté en tel ou tel élément chimique à un endroit donné.

C'est ainsi que des vertisols de la région d'Andorinha (Etat de Bahia - Brésil), formé à partir de péridotites (1), contiennent assez de carbonate de calcium dans leur horizon (B) pour faire effervescence à froid à l'acide chlorhydrique, mais tout de même pas assez, par rapport au magnésium, pour porter une végétation d'aussi belle venue que celle des sols voisins dérivés de roches mieux équilibrées en ces deux éléments (Ca et Mg).

Il importe donc d'éviter toute attitude systématique si l'on considère uniquement les données géologiques.

Altérabilité des minéraux contenant calcium et magnésium

Les minéraux contenant calcium et magnésium sont les plus facilement altérés par les agents météoriques; le fer qui entre bien souvent dans leurs édifices cristallins s'oxyde le premier et les fait éclater (pyroxènes et amphiboles par exemple).

D'autre part, les plagioclases n'ont pas une composition chimique homogène si l'on passe de la superficie au centre du cristal et cette particularité les rend plus aisément altérables que les feldspaths alcalins.

Ce phénomène explique en particulier la forte susceptibilité de ces minéraux lors de l'altération des roches et a une grande importance pour la libération de ces bases lors de la première phase de la formation des sols.

1.2. Devenir du calcium et du magnésium lors de l'altération des roches et au cours de la pédogenèse

Importantes pertes en calcium et magnésium au cours de la pédogenèse

On assiste, lors des processus complexes qui président à la formation d'un sol à partir de la roche-mère, à une élimination extrêmement importante du calcium et du magnésium et, ceci, dès le stade d'altération de la roche. Quelques exemples suffiront à donner une idée de l'intensité de ce phénomène en régions tropicales humides.

(1) Roches qui, rapellons-le, ne devraient pas contenir de calcium si elles étaient exclusivement composées de péridots.

Cas d'un granite calco-alcalin de Côte d'Ivoire

Leneuf (1959) a mesuré les pertes en éléments minéraux d'un granite calco-alcalin de la région forestière de Côte d'Ivoire lors de la ferrallitisation complète de la roche sous une pluviosité de 1800 à 2000 mm (tableau I-2).

TABLEAU I.2

Pertes en cations alcalins et alcalino-terreux lors de la ferrallitisation d'un granite calco-alcalin d'après Leneuf (1959)

Teneur de la roche fraîche densité 1,26 Eléments minéraux en %		Pertes en éléments pour une ferrallitisation complète kg/m ³	
CaO	1,20	Ca	24,8
MgO	0,20	Mg	0,46
K ₂ O	4,75	K	102,8
Na ₂ O	4,24	Na	81,6

Ces pertes extrêmement importantes sont des pertes « potentielles » valables seulement s'il y a élimination totale de la silice des silicates de la roche. Il pourrait donc s'agir d'une vue quelque peu théorique; mais des pertes du même ordre de grandeur furent calculées par Bonifas (1959) lors de l'altération ferrallitique « in situ » des dunites, dolérites et syénites nephéliniques de Guinée.

Cas d'un basalte du Cameroun

Etudiant l'ensemble des transformations qui, à partir d'un basalte de l'Adamoua au Cameroun, donnent naissance à un sol ferrallitique de neuf mètres de profondeur, sol situé à 1100 mètres d'altitude et soumis actuellement à une pluviosité annuelle de 1500 millimètres, Sieffermann (1973) donne le tableau d'analyses suivant (tableau I.3).

TABLEAU I.3

Pertes en éléments totaux lors de la transformation d'un basalte du Cameroun en sol d'après Sieffermann (1973)

Horizon	Prof. du préle- vement	P ₂ O ₅ %	Mn ₃ O ₄ %	Na ₂ O %	K ₂ O %	MgO %	CaO %
A (0-15 cm)	5	0,25	0,19	0,03	0,1	0,6	0,2
B ₁ Ox (15-60 cm)	25	0,20	0,16	0,03	0,05	0,5	0,2
B ₂ Ox (60-235 cm)	105	0,20	0,16	0,03	0,05	0,5	0,2
B ₃ Ox cn (235-255 cm)	240	0,20	0,16	0,03	0,05	0,5	0,2
B ₄ Ox (235-350 cm)	310	0,17	0,21	0,03	0,05	0,5	0,2
BC (350-470 cm)	360	0,25	0,22	0,03	0,05	0,7	0,2
CG (470-900)	600	0,30	0,31	0,03	0,10	0,7	0,2
Roche 900	950	0,50	0,20	1,6	1,2	15,2	8,65

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

Les minéraux alcalins (K-Na) et alcalino-terreux (Ca-Mg) sont les plus fortement entraînés lors de la formation du sol. Globalement les pertes apparentes atteignent 95 à 98 % lorsque l'on passe de la roche à l'horizon B₂. Mais il

ne s'agit encore que de pertes apparentes, car si l'on introduit une correction afin de tenir compte des densités respectives du basalte et du sol, on arrive à des pertes réelles de l'ordre de 98 à 99 % du calcium et du magnésium (et aussi du potassium et du sodium) contenus à l'origine dans la roche.

On peut noter que la quasi totalité de l'élimination se produit au stade de l'altération de la roche.

Cas des calcaires et dolomies

Les carbonates se dissolvent sous l'action du gaz carbonique contenu dans les eaux de percolation ; donc en principe ces roches devraient être plus rapidement solubilisées en régions froides qu'en régions chaudes, ce gaz étant plus facilement dissous par l'eau à basse température. En fait, cette infériorité paraît compensée en régions tropicales chaudes et humides par l'abondance des pluies et leur concentration dans le temps.

Les calcaires (et dolomies) durs s'altèrent par excoaration, chaque année, d'une mince pellicule de décarbonatation contenant encore beaucoup de calcaire : dès que le sol s'approfondit et vieillit, la décarbonatation devient complète, et seuls quelques minéraux résiduels et le complexe absorbant du sol contiennent encore calcium et magnésium (Lamouroux, 1972). Le terme ultime pourra être une argile totalement décarbonatée et parfois même à peu près complètement décalcifiée (1).

Lorsque calcaires et dolomies sont tendres ou fortement fissurés, l'altération se fait dans la masse sans modification apparente du volume (Durand et Dutil, 1971) au moins au début, car les fortes dissolutions conduisent assez vite à un effondrement des structures primitives. Le résultat final de l'évolution reste le même que précédemment : sols décarbonatés encore riches en calcium et magnésium échangeables et, finalement, sols décalcifiés à complexe absorbant désaturé.

Bien que ces processus aient surtout été étudiés en zones tempérée et méditerranéenne, il semble que l'on puisse les transposer sans grande difficulté aux régions intertropicales (Riché, comm. pers.).

Teneur des sols en calcium et magnésium et richesse de la roche-mère en ces éléments

Le sol étant fils d'un matériau originel, il paraît logique de penser qu'il hérite une certaine quantité du calcium et du magnésium contenus dans la roche-mère, malgré les éliminations sévères et les pertes intenses subies au cours de la pédogenèse.

Pédologues et prospecteurs connaissent bien cette particularité : ainsi des sols aptes à porter du cacaoyer, plante fort exigeante, dérivent le plus souvent de roches basiques, gneiss à amphibole, diorite, gabbros, basalte, etc..., tandis qu'un grès purement quartzitique donnera naissance à des sols habituellement mal pourvus en cations alcalino-terreux. Le basalte profondément altéré du Cameroun, cité au paragraphe précédent (Tableau I.3), n'engendre point un sol particulièrement pauvre, bien au contraire, malgré l'intensité des pertes encourues lors de la pédogenèse : son horizon superficiel contient entre 3 et 11 milliéquivalents pour la somme calcium plus magnésium échangeables pour 100 grammes

(1) Une décalcification de cet ordre ne se produit guère que sous climat tropical humide, car en zone méditerranéenne il est rare que la désaturation du complexe absorbant soit inférieure à 40 % de la capacité d'échange (Lamouroux, com. pers.).

de sol, ce qui est fort honorable (Sieffermann, 1973). Dans le Sud de l'Etat de Bahia, au Brésil, les sols de la série Produção de la région d'Itabuna dérivés de diorite migmatisée, bien que cultivés en cacaoyers depuis plus d'un siècle, sont encore assez riches en nutriments minéraux pour que les rendements se maintiennent à un niveau très satisfaisant malgré l'absence d'engrais (Ferreira et Oliveira, 1970) ; mais les sols voisins formés sur sédiments ou pédiments quaternaires originellement fort mal fournis en bases ne peuvent guère être utilisés que comme pâturages extensifs.

Et il serait possible de multiplier de tels exemples. Toutefois, on peut citer *a contrario* des cas où la composition de la roche ne paraît guère avoir d'influence sur les teneurs en calcium et magnésium du sol.

Ainsi les latosols d'Amazonie répertoriés par Falesi (1972) (tableau I.4) ont des sommes de bases échangeables (essentiellement calcium et magnésium) qui sont apparemment sans lien direct avec la nature de la roche-mère.

TABLEAU I.4
Teneurs en bases échangeables de l'horizon supérieur (A)
de quelques sols ferrallitiques de l'Amazonie d'après Falesi (1972)

	Sommes des bases échangeables en A mé/100 g	Taux de saturation en A V %	Nature de la roche-mère
Latosol jaune à texture lourde (55 % d'argile en A)	0,36	5	Schiste micacé du Dévonien
Latosol jaune à texture argilo-sableuse en A (35 % d'argile)	0,67	5	Gneiss et migmatites du Précambrien dont la composition va de celle des granites aux granodiorites
Latosol jaune à texture moyenne en A (25 % d'argile)	0,32	3	Grès du Dévonien inférieur
Sol ferrallitique dystrophe à concrétions (20 % d'argile en A)	1,75	8,8	Gneiss et migmatites du Précambrien (composition allant de granite à la granodiorite)
Sol ferrallitique eutrophe à concrétions (19 % d'argile en A)	3,95	59	idem
Extraction des bases échangeables par les réactifs suivants :			
K Cl neutre et normal pour Ca et Mg			
H Cl 0,05 N pour le sodium et le potassium			

Les sols de la vallée du Niari au Congo, bien que formés à partir d'un schiste calcaire sont si désaturés en calcium et magnésium que l'acidité supplémentaire développée par quelques cultures d'arachide suffit à les rendre impropres à porter cette plante (Martin G., 1964 et 1970).

En Malaisie, seuls les sols jeunes (sur alluvions marines) ou rajeunis par l'érosion ont en surface plus de 0,5 milliéquivalent de calcium par 100 g de sol dans leur horizon de surface (Coulter, 1972).

Facteurs influant sur la teneur des sols en calcium et magnésium indépendamment de la roche-mère

Intensité des précipitations et du drainage

Dans les régions très humides, la pluie est un facteur essentiel de l'appauvrissement des sols en nutriments minéraux ; constamment supérieure à l'évapotranspiration potentielle (cas de la Guyane, de l'Amazonie, etc.), on conçoit qu'elle puisse engendrer un drainage important. Cette action s'accroît du fait que les précipitations les plus intenses sont souvent concentrées sur de courtes périodes : ainsi dans la région d'Abidjan, la moitié du drainage annuel (400 mm sur 900 mm) a lieu en 2 à 3 mois (Roose, 1973 et 1974).

On pourrait penser que ce phénomène ne joue plus ou fort peu dans les régions soudanaises ou soudano-guinéennes à longue saison sèche, où l'évapotranspiration potentielle dépasse largement le volume des précipitations. En fait, la concentration sur quelques mois des pluies les plus importantes engendre un drainage d'une intensité certaine que Cocheme et Franquin (1967) ont calculé à partir des données climatiques (Tableau I.5).

TABLEAU I.5
Comparaison de la pluviosité et du drainage calculé en Afrique de l'Ouest d'après Cocheme et Franquin (1967)

Localisation	Pluviosité mm	Drainage calculé mm
Zone équatoriale à 4 saisons		
Dabou (Côte d'Ivoire)	2 298	1 409
Abidjan (Côte d'Ivoire)	2 087	1 171
Cotonou (Bénin)	1 305	374
Bouaké (Côte d'Ivoire)	1 221	105
Zone tropicale dite humide		
Odienné (Côte d'Ivoire)	1 662	612
Ina (Bénin)	1 373	504
Sokodé (Togo)	1 399	444
Ferkessoudou (Côte d'Ivoire)	1 346	370
Bobo-Dioulasso (Haute-Volta)	1 185	279
Zone tropicale sèche		
Kandi (Bénin)	1 024	348
Ouagadougou (Haute-Volta)	1 099	351
Bamako (Mali)	882	147
Thiés (Sénégal)	694	144
Saint-Louis (Sénégal)	346	0

Les études expérimentales effectuées *in situ* confirment en gros ces chiffres : ainsi on a trouvé que, près d'Abidjan, le drainage moyen était de 800 à 1 000 mm pour 2 mètres de pluie (Roose, 1973) et que dans les cases lysi-

métriques de Bambey au Sénégal (pluviosité moyenne 800 mm, il variait entre 100 et 150 mm suivant les années et l'état de la couverture du sol (Charreau, 1972).

Les drainages calculés par Cocheme et Franquin paraissent donc donner un ordre de grandeur tout à fait satisfaisant.

On a tenté de savoir à partir de quelle intensité de précipitations, l'action de la pluie l'emportait sur l'influence de la roche-mère. L'expérience acquise tant en Afrique occidentale qu'à Madagascar a montré qu'une pluviosité moyenne annuelle de 1 700 mm séparait approximativement deux catégories de pédogenèse en ce qui concerne les teneurs en bases échangeables (essentiellement calcium et magnésium) de ces sols : pour des pluviosités inférieures à 1 700 mm, les caractéristiques de la roche-mère influent nettement sur la richesse et la saturation du complexe absorbant, tandis qu'au-dessus les sols sont uniformément pauvres et désaturés quelle que soit la nature pétrographique du matériau originel.

Il s'agit évidemment là d'une « règle » empirique. Si elle permet d'expliquer pourquoi les sols du Gabon, de l'Amazonie, de la basse Côte d'Ivoire, etc. sont uniformément pauvres malgré des substratums variés, elle souffre de nombreuses exceptions : par exemple les sols de la vallée du Niari issus de schistes calcaires ou ceux du Sud du Brésil formés sur basalte sont désaturés et acides malgré la richesse de la roche-mère en calcium et magnésium et une pluviosité actuelle qui atteint approximativement 1 200 mm dans les deux cas.

Elle ne peut non plus, inversement, rendre compte de la fertilité due aux nutriments minéraux de certains sols des Antilles, d'Indonésie et d'ailleurs pourtant fort bien arrosés par le ciel.

L'âge et la profondeur du sol

Plus un sol vieillit, plus il s'approfondit ; on conçoit facilement que les caractéristiques minérales de la roche-mère aient alors de moins en moins d'influence sur les caractéristiques chimiques de la partie supérieure du sol.

En région semi-humide ou relativement sèche (zone soudano-guinéenne et soudanienne en Afrique) où la pédogenèse est relativement peu « agressive », la profondeur des sols ne dépasse généralement pas quelques mètres ; il n'est pas rare que les propriétés des sols relèvent, sinon totalement, du moins partiellement, de celles de la roche.

Mais sous climat humide (plus de 1 200 mm de pluie), les sols ferrallitiques ont fréquemment des profondeurs de 6 à 20 et même 30 mètres, l'évolution pédogénétique qui leur a donné naissance s'étendant sur des dizaines et même des centaines de millénaires (à titre d'exemple l'âge du sol sur basalte du Cameroun, Tableau I.3, est évalué à 400 000 ou 500 000 ans, en prenant comme hypothèse que le climat soit resté semblable à ce qu'il est actuellement durant cette période, ce qui n'est nullement prouvé). Il n'est pas étonnant que, dans ces conditions, le sol, tout au moins sur sa partie supérieure, évolue indépendamment du matériau qui lui a donné naissance.

Certains processus viennent toutefois contrecarrer l'appauvrissement en bases, typique des vieux sols ferrallitiques.

a) *L'érosion* : Dans les cas de pentes constamment décapées par l'érosion, les sols restent peu épais, et de ce fait sont plus riches en bases que les sols profonds des plateaux. Aussi, en arrive-t-on à la conclusion quelque peu paradoxale que les premiers sont les plus favorables à une mise en valeur agricole (Boissezon et Gras, 1970 au Congo, Bourgeat et al., 1973 à Madagascar), ce qui pose, par ailleurs, de très graves problèmes de conservation s'il y a culture.

b) *Apport de cendres volcaniques* : Un saupoudrage par cendres volcaniques peut également apporter au sol des minéraux qui en s'altérant enrichiront le complexe absorbant en bases (Segalen, 1967). C'est un cas fréquent dans les régions volcaniques.

c) *Les remontées biologiques* : Ces remontées biologiques peuvent être dues à l'action de la faune du sol : les termitières, en particulier, sont le siège d'une accumulation de sels minéraux (Boyer Ph., 1956 ; Stoops, 1964) ; on y a aussi observé localement des concrétions calcaires et des accumulations de sels solubles liées à des phénomènes hydriques (Boyer Ph., 1959 ; Watson, 1969). Malgré l'ampleur de l'action des termites en certaines régions (Sys, 1957), cet enrichissement du sol par les termitières peut avoir des conséquences agricoles variables suivant les zones géographiques et les types de termitières. Notons toutefois qu'après arasement, l'emplacement des énormes termitières épigées d'Afrique centrale reste parfaitement stérile, en raison de l'absence de matière organique, et d'une structure défavorable ; par contre, si l'on veut faire des cultures vivrières sur certains sols lessivés et appauvris de Thaïlande, il est nécessaire d'araser ces édifices et d'épandre leurs matériaux afin de profiter des éléments minéraux qu'ils contiennent (Thorpe, 1967).

La végétation a un rôle similaire mais beaucoup plus régulier et plus uniformément réparti géographiquement que l'action des cendres volcaniques ; elle concerne essentiellement la surface. Dans le sol camerounais cité plus haut (tableau I.3) l'horizon supérieur du sol est enrichi en bases par rapport aux autres horizons plus profonds (il serait possible de multiplier les exemples de ce type de par le monde). Cet enrichissement est essentiellement dû à l'action des racines qui vont puiser en profondeur une certaine quantité d'éléments, lesquels se trouvent incorporés ensuite aux tissus végétaux aériens, puis restitués à la partie superficielle du sol. Nye et Greenland (1960) estiment que les apports au sol d'éléments par la grande forêt du Ghana âgée de 40 ans sont de 270 kg de calcium et de 62 kg de magnésium par an.

Roose (1974) a constaté sous forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire que les eaux de drainage percolant à travers la tranche supérieure du sol (épaisse de 1,50 m) avaient une charge moyenne de 11 mg/litre en calcium et de 7 mg/litre en magnésium, alors qu'une source située 30 m plus bas ne contenait plus en moyenne que 2,43 mg/litre de calcium et 0,40 mg/litre de magnésium. Il est vraisemblable que les racines profondes de la végétation forestière jouent un certain rôle dans cet appauvrissement des solutions mobiles dans le sol, même si on peut invoquer d'autres causes.

Malheureusement, les processus de pédogenèse conduisent à l'approfondissement progressif du sol ; il s'ensuit, si la profondeur s'exagère, une difficulté puis une impossibilité pour les racines d'atteindre la base de l'horizon d'altération et de compenser les pertes dues à la lixiviation. Ceci est particulièrement net pour les sols développés sous les climats les plus pluvieux (sols ferrallitiques essentiellement) ; d'où la pauvreté chimique de tant de sols d'Afrique centrale (Gabon, Cameroun, Congo, Zaïre) ou d'Amérique du Sud (Amazonie, Guyane, Llanos de Colombie et du Venezuela, sols de tabuleiros du Brésil) et d'Asie (Coulter, 1972 pour la Malaisie).

2. — APPORT DE CALCIUM ET DE MAGNÉSIUM PAR L'ATMOSPHÈRE

2.1. Calcium et magnésium contenus dans l'eau de pluie

aérosols contenant un peu de calcium et de magnésium. Les unes et les autres, Il y a toujours en suspension dans l'atmosphère des poussières et des

rabattues au sol par la pluie, lui apportent ces éléments en quantités relativement faibles mais non négligeables. On trouvera sur le tableau I.6 un certain nombre de résultats obtenus en région tropicales et aussi, à titre de comparaison, des données provenant d'Angleterre (Berkshire) et du Liban.

TABLEAU I.6
Calcium et magnésium apportés au sol par l'eau de pluie

Localisation	Calcium kg/ha/an	Magnésium kg/ha/an	Source
Malaisie	38	3	Shorrocks (1965-c)
Zaïre			
Kinshassa	4,58	0,92	Meyer et Dupriez (1959)
Yangambi	3,88	1,15	
Mulunga	4,08	1,26	
Cameroun			
Yaoundé	3,8	1,5	Boyer (1973)
Côte d'Ivoire			
Abidjan	30,4	7,2	Roose (1974)
Ghana			
Kade	12,6	11,3	Nye (1961)
Angleterre			
Berkshire	19,0	1,7	Low et Armitage (1970)
Libourn			
Merdgayoum	4,8	3,1	Lamouroux (1972)

2.2. Origine des éléments minéraux apportés par les eaux de pluie

La variabilité des chiffres obtenus par les divers auteurs cités conduit à poser la question de l'origine du calcium et du magnésium trouvés dans les pluviomètres.

Pour Meyer et Dupriez (1959), la proportion des cations apportés au sol par l'eau de pluie est à peu près la même que dans la partie supérieure des sols et dans les cendres végétales et ils en concluent à l'origine exclusivement terrestre et locale de ces éléments : *il ne s'agirait donc que d'une simple restitution*. Par contre pour Mathieu et Monnet (1970), les aérosols d'origine marine pourraient fournir une part importante des cations et anions récupérés dans les pluviomètres de Côte d'Ivoire, même à 600 kilomètres de la mer ; mais en ce qui concerne plus particulièrement le calcium et le magnésium, ils pensent qu'il existe une forte contamination terrigène.

On pourrait aussi supposer qu'en Afrique de l'Ouest, l'harmattan, vent provenant du Sahara qui souffle plusieurs mois par an, apporte une certaine quantité de poussières ; or l'harmattan ne touche que fort peu le Zaïre.

Malheureusement ceci n'explique pas les chiffres élevés, surtout en ce qui concerne le calcium, trouvés en Malaisie par Shorrocks (1965 c).

2.3. Conséquences agronomiques

En l'absence d'expérimentations systématiques et nombreuses, il semble qu'il faille être prudent dans l'interprétation de ces données et ne pas généraliser à l'ensemble des régions tropicales les chiffres portés sur le tableau I.6, mais utiliser, si elles existent, des mesures régionales et même locales. Malgré tout, ces chiffres montrent que les apports de calcium et de magnésium par les eaux de pluies ne sont pas négligeables, loin de là, surtout lorsqu'il s'agit de sols fort mal pourvus en ces éléments (Shorrocks, 1965 c ; Roose et Talineau, 1973 ; etc.).

3. — APPORT DE CALCIUM ET DE MAGNÉSIUM LA VÉGÉTATION

3.1. Teneur en calcium et magnésium de la végétation naturelle des régions tropicales

La biomasse végétale accumule toujours une certaine quantité de calcium et de magnésium, qu'elle peut, suivant les circonstances, restituer au sol en totalité ou en partie.

Malgré quelques discordances entre les résultats répertoriés sur le tableau I.7, on peut retenir deux conclusions importantes :

— tout d'abord le volume énorme d'éléments minéraux contenus dans la végétation de la grande forêt : Nye et Greenland (1960) estiment qu'il est largement supérieur à celui qui se trouve sous forme d'éléments échangeables dans les 30 centimètres superficiels des sols du Ghana ;

— le pouvoir d'accumulation du calcium et du magnésium par la végétation après remise en jachère : à courte échéance (trois ans) graminées et recru forestier ont à peu près le même potentiel ; par contre âgé de 6 ans, ce dernier s'affirme comme le meilleur « accumulateur », supériorité qui s'accuse encore lorsque la forêt issue de ce recru forestier est âgée de 10, 20 ans et plus.

3.2. Recyclage annuel du calcium et du magnésium contenus dans la végétation

Il ne faudrait pas croire que ces éléments minéraux sont définitivement immobilisés par la végétation ; en effet, ils subissent un recyclage continu, le « turn-over » des anglo-saxons. Selon Nye et Greenland (1960), le pluvio-lessivage (lavage des feuilles par la pluie) apporte par an au sol dans une forêt sempervirente du Ghana 11,8 kg/ha de calcium et 7,25 kg/ha de magnésium, quantités faibles mais non négligeables par rapport aux éléments restitués par la chute annuelle de 8,8 tonnes de débris végétaux de toutes sortes (soit 118,6 kg/ha de calcium et 21,3 kg/ha pour le magnésium). Le recyclage annuel calculé par ces auteurs atteint donc 12 % pour le calcium et 18 % pour le magnésium, valeurs tout à fait comparables à celles qu'ils ont trouvés pour les autres nutriments essentiels N : 11 % ; P : 11 % ; K : 32 %). Naturellement, l'importance relative de ce recyclage serait plus grande s'il s'agissait d'un recru forestier jeune.

TABLEAU I.7
Éléments minéraux contenus dans la végétation des régions tropicales

Type de végétation	Localisation	Ca kg/ha	Mg kg/ha	Source
Forêt sempervirente	Amazonie Manaus	2 030	816	Klinge (1972)
Forêt sempervirente âge 40 ans	Ghana Khade	2 254	346	Nye et Greenland (1960)
Forêt sempervirente	Côte d'Ivoire Banco	445(1)	198(1)	Bernhard (1969)
Forêt sempervirente 17-18 ans	Zaïre Yangambi	822		Bartholomew et al. (1953)
Recru forestier 8 ans	"	668		"
Recru forestier 5 ans	"	421		"
Recru forestier 2 ans	"	160		"
Forêt semi-décidue	Ghana	527	212	Nye et Greenland (1960)
Savane arbustive à <i>Andropogon</i> 20 ans	Ghana	270(2)	66(2)	Nye et Greenland (1960)
Brousse arbustive	Ghana	441	104	"
Savane à <i>Imperata</i>	Ghana	13	23	"
Jachère à <i>Panicum maximum</i> 3 ans	Zaïre Yangambi	169		Bartholomew et al. (1953)
Jachère à <i>Setaria sphacelata</i> 3 ans	Zaïre Yangambi	151		"
Jachère à <i>Cynodon dactylon</i> 3 ans	Zaïre	250		
Jachère à <i>Pennisetum purpureum</i> 1 an	Zaïre Yangambi	17	35	Laudelout Germain Kesler (1954)
(1) Ca et Mg des racines non compris ;				
(2) Ca et Mg des racines estimées				

Bien que Nye et Greenland (op. cit.) laissent supposer que ce « turn-over » s'effectue sans pertes notables, il faut également citer l'opinion de Brinkmann (1972) qui accuse le pluvio-lessivage d'être en grande partie responsable de la pauvreté en calcium des sols de l'Amazonie, ce processus étant surtout intense lors des fortes chutes de pluies qui sont aussi celles qui provoquent les drainages les plus importants.

3.3. Les conséquences du défrichement sur les teneurs en calcium et magnésium du sol

Lors des défrichements, la végétation naturelle est très généralement brûlée et ses éléments minéraux font retour au sol en une seule fois.

Cas d'une savane

Les sols sous couvert de savane sont généralement mieux fournis en nutriments minéraux que les sols forestiers voisins (Martin D., 1973), ce qui ne suffit pas toujours, loin de là, à leur donner la même fertilité potentielle que les seconds.

Soit une tranche superficielle de terre de 20 à 25 cm d'épaisseur, (3 000 tonnes environ), ayant une teneur moyenne en éléments échangeables de 1 milliéquivalent de calcium et 0,6 de magnésium, le calcul indique qu'elle contient 600 kg de calcium et 210 kg de magnésium par hectare.

On peut concevoir d'après les chiffres cités au tableau I.7 que l'apport minéral de la végétation à Imperata du Ghana (13 kg de Ca et 23 kg de Mg par hectare) ou de la jachère de un an à *Pennisetum purpureum* de Yangambi (17 kg de Ca et 35 kg de Mg par hectare), soit, sinon négligeable, du moins proportionnellement très faible, même dans le cas de ce sol plutôt pauvrement fourni en bases.

Les perspectives changent avec les jachères herbacées de 3 ans de Yangambi (entre 154 et 250 kilogrammes par hectare pour la somme calcium-magnésium) et surtout avec la brousse arbustive du Ghana qui apporte au sol les deux tiers du calcium et la moitié du magnésium préexistant dans le sol ici pris comme exemple.

On ne peut donc qu'insister sur la nécessité de brûler sur place, le plus uniformément possible (ce qui est fort délicat à réaliser en pratique), la végétation arbustive, au lieu de débarder les bois sur les côtés du champ comme c'est trop souvent le cas.

Cet apport par les cendres aura proportionnellement moins d'importance dans un sol comportant 2 à 3 milliéquivalents de calcium et à peu près 1 milliéquivalent de magnésium par 100 g de terre, mais il n'en sera pas moins bénéfique pour les cultures.

Cas d'une forêt dense

Les expérimentateurs se sont surtout intéressés à l'évolution du stock d'éléments minéraux après abattage et brûlis de la forêt en raison de la pauvreté originelle assez générale des sols situés sous forêt et de l'importance pondérale de ces éléments contenus dans la végétation forestière.

Quelques exemples permettront de se rendre compte des variations des teneurs en magnésium et calcium du sol après cette opération (tableau I.8).

L'incinération de la grande forêt fait subir au calcium du sol une augmentation de l'ordre de 1 à 6, au magnésium de 1 à 3 ou 4, tandis que les pH primitivement très acides dans ces sols deviennent acceptables. En outre, la balance minérale se trouve sensiblement améliorée par les cendres : alors qu'elle était en pourcentage pour Ca, Mg et K de 48/38/18 sous forêt à Yangambi, elle passe à 55/30/15 après brûlis, d'où un meilleur équilibre dans les proportions relatives d'éléments minéraux (Laudelout et Van Bladel, 1967).

Un tel apport améliore donc sensiblement la fertilité chimique des sols forestiers, souvent très pauvres, des régions intertropicales et représente souvent une condition indispensable à la réussite des cultures. Mais c'est malheureusement une fertilité éphémère (Berger, 1964 ; Brinkman et Nascimento, 1973), problème qui sera développé dans les paragraphes consacrés à la dynamique du calcium et du magnésium dans les sols (chap. VII, § 3).

TABLEAU I.8
Variations des teneurs en calcium et magnésium du sol
dues à l'incinération de la forêt

Localisation	pH		Ca		Mg		Auteur	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après		
Zaïre Yangambi (Recru de 30 ans)	1	4,1	5,7	0,14	0,96	0,12	0,61	Laudelout (1954)
	2	4,4	6,0	1,18	1,34	0,16	0,62	
Côte d'Ivoire(*) (près Abidjan)		4,3-4,4	—	0,17	1,18	0,14	0,57	Godefroy, Tisseau Lossois (1972)
Guyane Française(**) Sol dit pauvre	1	—	—	0,15	0,79	0,10	0,41	Turenne (1969)
	2	4,2	5,9	0,53	3,90	0,37	1,02	
Amazonie (Manaus)				Ca + Mg				Brinkmann et. Nascimento (1973)
Latosol		3,8	4,8	Avant	Après	0,3	1,6	
Sol hydromorphe		3,9	6,7	0,2	1,9			

* Tous les bois d'un diamètre supérieur à 15 cm furent débardés avant le brûlis.

** Prélèvement effectué 3 mois après un brûlis léger qui respecta troncs et grosses branches.

4. — CONCLUSION

Prospecteurs et pédologues ont trop souvent l'habitude de considérer que la somme des bases échangeables d'un sol et la saturation du complexe absorbant, dues pour 70 à 95 % au calcium et au magnésium, dépendent étroitement de la nature de la roche-mère, malgré les pertes énormes en éléments minéraux enregistrées lors de la décomposition de cette roche-mère.

Cette vue se révèle à peu près exacte quand il s'agit de sols dont la faible profondeur relative permet aux racines de s'alimenter à partir de l'horizon d'altération ou encore lorsque ces sols se développent sous des climats relativement secs ; ce n'est plus le cas dans les climats humides où les précipitations moyennes annuelles sont supérieures à 1 700 mm, bien que cette limite souffre de nombreuses exceptions.

L'agronome tiendra compte, lors du défrichement, des apports minéraux dus à la destruction de la végétation, apports considérables dans le cas de la grande forêt des tropiques humides où les teneurs en calcium et en magnésium de la partie superficielle des sols peuvent alors être multipliées respectivement par six et trois ; de ce fait, ils représentent l'essentiel de la fertilité chimique des futures plantations. Ils sont beaucoup plus faibles s'il s'agit de savanes, à la fois en valeur absolue étant donné le moindre volume des masses végétales, et en valeur relative, les sols de savane étant généralement mieux fournis en bases à l'état vierge que les sols forestiers. Malgré tout, on s'aperçoit sans peine que cette dernière supériorité est bien souvent illusoire si l'on fait la somme des éléments minéraux contenus et dans le sol et dans la végétation.

Enfin, dans le bilan du calcium et du magnésium des sols, il faut se garder d'oublier les quantités d'éléments apportées par la pluie. En dépit de variations locales, apparemment fort importantes, cet apport par sa régularité, constitue souvent un facteur faible mais non négligeable du réapprovisionnement des sols en éléments minéraux.

CHAPITRE II

Les formes du calcium et du magnésium dans les sols

1. — DÉFINITION DES PRINCIPALES FORMES DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DU SOL

Depuis que l'anglais Way (1850 et 1852) eut magistralement défini au milieu du siècle dernier les propriétés du complexe absorbant des sols, agronomes et chimistes du sol ont pris l'habitude de séparer, d'une part les cations échangeables adsorbés à la surface des colloïdes du sol et dont la fixation (ou la désorption) est régie par la loi de Donnan, et d'autre part, les réserves minérales définies comme la différence entre la totalité d'un élément présent dans le sol et la quantité de cet élément présent sous forme échangeable. Cet exposé se conformera à ce schéma classique, tout en s'efforçant de distinguer dans quelle mesure les réserves de calcium et de magnésium peuvent passer sous forme échangeable.

2. — CALCIUM ET MAGNÉSIUM ÉCHANGEABLES

2.1. Le complexe absorbant

Le calcium et le magnésium sont adsorbés au même titre que les autres cations sur la surface des colloïdes minéraux et organiques ; ils s'y fixent en y neutralisant les charges négatives. Calcium et magnésium forment habituellement dans les sols entre 70 et 95 % des bases dites échangeables.

La kaolinite, principal constituant de beaucoup de sols des régions inter-tropicales, possède une capacité d'échange faible (5 à 10 milliéquivalents pour 100 g d'argile), contrairement à l'illite (20 à 30 mé/100 g) et surtout à la montmorillonite (80 à 120 mé/100 g) et aux vermiculites (80 à 130 mé/100 g). Toutefois une argile de la famille de la kaolinite, l'halloysite fréquente dans les

sols dérivés de roches effusives, basalte par exemple, a une capacité d'échange voisine de celle de l'illite (20 mé/100 g). En zone humide, toujours sur roches volcaniques, on trouve également des allophanes dont la capacité d'échange, bien que mal connue, est relativement élevée.

Il existe en zone intertropicale des sols à montmorillonite dominante, vertisols et sols bruns eutrophes surtout fréquents en zone sèche, et plus rarement des sols relativement bien fournis en illite héritée (quelques sols ferrallitiques par exemple au Gabon) ou secondaire (sols fersiallitiques des régions semi-arides) ; mais la majeure partie des sols des régions chaudes ne contient guère que de la kaolinite (et parfois de l'halloysite), comme c'est le cas pour l'immense classe des sols ferrallitiques. Les sols de la sous-classe, si largement représentée en Afrique sèche, des sols ferrugineux tropicaux sont également riches en kaolinite, mais aussi en illite. La capacité d'échange de la fraction minérale de ces sols sera donc très inférieure à celle de la plupart des sols tempérés dont la fraction argileuse contient généralement en mélange montmorillonite, illite et kaolinite bien qu'en proportions variables.

La matière organique ajoute à la partie supérieure des sols une capacité d'échange importante, entre 100 et 200 milliéquivalents pour 100 g de matière organique dans les sols forestiers de Côte d'Ivoire selon de Boissezon (1973). Cet auteur remarque d'ailleurs que cette valeur est intermédiaire entre les humus à Mor et les humus à Mull des pays tempérés ; pour ces derniers T tourne autour de 350 à 400 milliéquivalents pour 100 g en ce qui concerne la matière organique seule (Demolon, 1952) ; comme l'horizon supérieur des sols sous forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire contient entre 5 et 11 % de matière organique, celle-ci est responsable de 45 à 80 % de la capacité d'échange de cet horizon. Quant aux sols sous savane, leur teneur plus faible en humus, entre 1,5 et 8 %, implique un rôle moindre dans les propriétés du complexe absorbant.

Or on sait que la mise en culture provoque une destruction rapide de l'humus, 40 % à 50 % du taux initial lors des deux premières années de culture, d'où une réduction parallèle de la capacité d'échange.

Ces quelques considérations, très incomplètes, permettent de comprendre les raisons de la faiblesse de la capacité d'échange de beaucoup de sols des régions intertropicales (essentiellement sols à kaolinite).

Il faudrait y ajouter l'« appauvrissement » en argile de la partie supérieure des sols, surtout important sous végétations de savane (Martin D., 1973), qui y diminue non seulement la teneur en colloïdes minéraux, mais aussi celle en colloïdes organiques, ces deux valeurs étant liées (Demolon, 1952 ; de Boissezon, 1973).

2.2. La saturation du complexe absorbant

On a déjà signalé que le calcium et le magnésium forment en gros entre 70 et 95 % des bases fixées sur le complexe absorbant (sauf s'il y a accident de salure) mais ceci n'implique pas que la capacité d'échange (mesurée à pH 7, soit saturée par les bases (Ca, Mg, K surtout).

Si les sols de zones semi-arides, ferrugineux tropicaux essentiellement, ont souvent en Afrique occidentale un complexe absorbant à peu près saturé (avec des pH voisins de 7) au moins en l'absence de cultures, les sols ferrallitiques peuvent présenter des situations extrêmement variables : le degré de saturation y varie de 70 à 90 % (cas de certains « sols à cacaoyers » d'Afrique occidentale) jusqu'à 1 ou 2 %, comme en Amazonie brésilienne (Fassbender et al., 1970). Dès que le pH s'abaisse au-dessous de 5, l'aluminium ionique a tendance à devenir le cation le plus abondant du complexe absorbant.

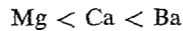
On a l'habitude de considérer que calcium, magnésium et potassium sont susceptibles de neutraliser indifféremment toutes les charges négatives des colloïdes, mais cette vue est inexacte lorsqu'il y a plusieurs cations en compétition.

En ce qui concerne le potassium, il semble bien que cet élément occupe préférentiellement certains sites d'échange réservés à lui seul (Beckett, 1964 ; Mohinder Sing, 1970 ; Boyer, 1973). Le même phénomène se produirait pour le magnésium qui ne pourrait guère se fixer que sur une quantité limitée de situations d'échange propres à ce cation (Mokwunye et Melsted, 1973). Par contre, le calcium serait adsorbé sur une très large gamme de positions (comme d'ailleurs l'aluminium).

2.3. Libération du calcium et du magnésium à partir du complexe absorbant

On admet généralement que les lois de Donnan régissent l'équilibre des éléments minéraux entre le complexe absorbant et la solution du sol ; tout appauvrissement relatif de cette dernière (par exemple à la suite d'un prélèvement par les racines) entraîne la libération d'une quantité correspondante de cations ; inversement, son enrichissement (après apport par fumure) provoque une fixation supplémentaire sur les colloïdes du sol.

En fait, la difficulté de déplacer les cations alcalino-terreux à partir du complexe d'échange des argiles intervient dans l'ordre suivant (Prince et *al.*, 1947) :



Mais si on appauvrit progressivement un sol en calcium échangeable, cet élément passe de plus en plus difficilement dans la solution ; c'est alors le magnésium qui est préférentiellement enlevé du complexe absorbant aux très basses teneurs en calcium (Demolon, 1952 ; Salmon, 1963).

Bien que ces considérations dérivent d'études faites en pays tempérés, il semble qu'on puisse les transposer sans difficulté aux sols tropicaux. On verra plus loin (chap. V, § 1) que la lixiviation du calcium et du magnésium concerne surtout le calcium lorsque le sol est relativement bien pourvu en cet élément et le magnésium si le sol contient peu de calcium.

Les colloïdes humides présentent les mêmes phénomènes de fixation et de libération de bases par équivalence ionique que l'argile, mais il faut noter que leurs surfaces internes sont plus difficilement accessibles aux échanges que celles des colloïdes minéraux. Cette difficulté est surtout manifeste dans le cas d'humus brut : Barbier (cité par Demolon, 1952) constatait en 1935 qu'un humus extrait de la tourbe puis saturé en calcium échangeait son calcium beaucoup plus parcimonieusement que l'argile mais que cet inconvénient s'atténuait considérablement s'il s'agissait d'un Mull bien mélangé à la matière minérale sous forme de colloïdes complexes. Malgré tout, les deux types de colloïdes ont tendance chacun à régler les échanges d'ions suivant une dynamique qui leur est propre (Demolon, *op. cit.* ; de Boissezon, 1973).

Quoiqu'il en soit, il est certain que les cations alcalino-terreux échangeables ont une mobilité plus faible que les ions alcalins (essentiellement le potassium et le sodium) ; ce fait, qui ressortait déjà d'études anciennes sur le complexe absorbant, se trouve confirmé, surtout en ce qui concerne le calcium, par des travaux faisant intervenir les isotopes radioactifs tant sur des sols tempérés (Newbould et Russel, 1963) que sur des sols tropicaux (Mazozera et Bouyer, 1971).

2.4. Variations saisonnières des teneurs du sol en calcium et magnésium échangeables, du pH et de la capacité d'échange

On a remarqué qu'assez souvent la somme des bases échangeables présentait une certaine variabilité au cours de l'année, ainsi que le pH, donnée qui synthétise un certain nombre de caractéristiques du sol, en particulier la saturation du complexe absorbant par les bases.

Quelques exemples de variations saisonnières

Bouteyre et Lepoutre (1959) ont constaté que des sols jeunes argileux, à hydromorphie saisonnière, de Bongor (Tchad), montrent une forte variabilité de pH et de la somme des bases échangeables entre juin (fin de la saison sèche) et octobre (fin de la saison des pluies). Assez curieusement (tableau II.1), pH et sommes des bases échangeables ont des variations de sens opposés, inhabituelles dans les sols convenablement drainés.

TABLEAU II.1

Variation de la somme des bases échangeables et du pH de sols sur argiles récentes au Tchad, d'après Bouteyre et Lepoutre (1959)

		Juin	Août	Octobre
Argiles à nodules calcaires	pH	6,1	6,9	7,0
	SBE	40	32	27
Argiles récentes	pH	4,5	5,2	5,4
	SBE	22	20	18

Plus classique est l'exemple proposé par Godefroy et Lossois (1966) des variations du pH, de la saturation en bases, et des bases échangeables sur un sol jeune formé sur lappilis volcaniques du Cameroun ; on y observe un minimum lors du fort de la saison des pluies (juillet-octobre) et un maximum pendant la grande saison sèche (novembre à février) : pH minima 6,2 à 6,3 ; maxima 6,5 à 6,6 (coefficient de variation faible mais malgré tout significatif),

- *calcium échangeable* : teneur moyenne au cours de l'année : 17 à 22 me/100 g suivant les échantillons (70 % de SBE) ; coefficient de variation : 17 à 22 % ;

- *magnésium échangeable* : teneur moyenne au cours de l'année : 4 à 5 me/100 g suivant les échantillons ; coefficient de variation de 13 à 46 % ;

- *somme des bases échangeables* : teneur moyenne de 24 à 31 me/100 g ; elle suit étroitement les oscillations du calcium échangeable, avec des coefficients de variation saisonniers de 10 à 19 %.

De l'avis même des auteurs, cette variabilité n'est pas assez importante pour influencer sur l'alimentation minérale du bananier, plante cultivée sur ces sols.

Enfin on peut citer un troisième exemple, celui d'un sol ferrallitique fortement désaturé couvert de forêt, situé à Komono, au Nord de Sibiti (Congo), où la saison sèche, peu marquée, va de juin à septembre (de Boissezon, com. pers.) ; les faibles teneurs en bases, combinées avec l'imprécision des analyses qui en résulte masquent toute évolution saisonnière, si elle existe. On peut d'ailleurs remarquer que le pH reste pratiquement stable (tableau II.2).

TABLEAU II.2

Variations saisonnières des bases échangeables et du pH dans un sol forestier de Komono (Congo) d'après de Boissezon (com. pers.)

Dates des prélèvements (0-15 cm)	13-XI	18-I	12-III	10-V	11-VII	21-IX	23-XI
Ca échang. mé/100	0,22	0,39	0,33	0,31	0,26	0,26	0,26
Mg échang. mé/100	0,04	0,01	0,09	0,12	0,02	0,07	tr
SBE mé/100 g	0,49	0,61	0,62	0,64	0,47	0,51	0,47
pH	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9	4,1

Discussion

Il semble difficile de tirer une conclusion des quelques données rapportées ci-dessus.

La couverture du sol paraît influencer sur l'intensité des variations saisonnières : Martin G. (1958) a trouvé que le pH variait de 1 unité dans les sols argileux du Niari (Congo) s'ils étaient cultivés, mais de 0,5 unité sous savane naturelle (maximum en fin de saison sèche, minimum en fin de saison des pluies). Mais également, sans doute, la composition granulométrique peut jouer : Bouyer (1959) n'observe aucune modification du pH suivant les saisons dans les sols sableux de Boulel dans le centre du Sénégal, contrairement à ce qui se passe pour les argiles du Niari.

Enfin, comme on a pu le constater pour les argiles récentes du Tchad, l'hydromorphie introduit un facteur « erratique » : les variations du pH y sont inverses de celles qui se manifestent dans les sols sains ; d'autres facteurs peuvent aussi entrer en jeu : ainsi Tomlinson (1957 c) attribue aux sulfures les valeurs de 7 en saison des pluies et de 4,3 en saison sèche pour les pH des rizières de Sierra Leone établies sur mangroves.

Quoiqu'il en soit, on ne peut que recommander à l'expérimentateur d'effectuer ses prélèvements à dates fixes au cours de l'année afin d'avoir des résultats analytiques comparables entre eux.

3. — LES RÉSERVES CALCIQUES ET MAGNÉSIENNES

3.1. Importance des réserves

Le calcium et le magnésium échangeables ne forment qu'une partie du total de ces éléments contenus dans les sols.

Ainsi les sols de l'Etat de São Paulo (Brésil) ont 0,01 à 2,0 milliéquivalents de magnésium échangeable pour 100 g de sol, alors que le magnésium total est compris entre 1,6 à 3,4 milliéquivalents, et 30 tonnes par hectare de calcium total (Malavolta, 1967) alors qu'il n'y a guère que quelques milliéquivalents, une dizaine au plus, de calcium échangeable pour 100 g de sol.

Mais bien souvent dans les sols ayant subi une longue évolution pédologique, les réserves sont relativement faibles, plus d'ailleurs pour le calcium que pour le magnésium.

Ainsi, en Casamance, les sols « beiges » et « rouges » (ferrugineux tropicaux et ferrallitiques) ont en surface 20 à 30 % de leur calcium et 55 à 80 % de leur magnésium sous forme non échangeable, lorsqu'ils ont encore leur couvert forestier (Fauck, Moureaux, Thoman, 1969) ; il faut noter qu'ici l'extraction du calcium et du magnésium est faite par attaque à l'acide nitrique bouillant qui ne révèle pas la totalité de ces éléments contenus dans le sol, mais donne malgré tout une approximation valable. Etudiant des sols oxiques de Sierra Leone (où le magnésium échangeable est presque toujours inférieur à 1 milliéquivalent pour 100 g de sol) et des alluvions du Viet-Nam beaucoup plus riches (entre 1 et 9 milliéquivalents/100 g de Mg échangeable), Mokwunye et Melsted (1972) constatent que les réserves magnésiennes non échangeables constituent en général 75 à 95 % du magnésium total dans les deux cas (tableau II.3).

Le lecteur trouvera en Annexe en fin de chapitre, un certain nombre de données chiffrées permettant de penser, en dépit de méthodes d'analyse différentes, que les réserves calciques sont généralement proportionnellement moins importantes que les réserves magnésiennes, dès que l'on a affaire à des sols pédologiquement évolués.

3.2. Formes des réserves calciques et magnésiennes

Lorsqu'il s'agit de sols jeunes peu profonds où il reste encore des minéraux de la roche-mère dans le profil, on comprend facilement qu'une analyse dite totale puisse extraire de ces minéraux des quantités de calcium et de magnésium très supérieures aux valeurs de ces cations sous forme échangeable. Il en est de même si le sol contient des montmorillonites et vermiculites dont certaines sont magnésiennes (à noter que ces argiles s'altèrent très facilement en conditions humides et chaudes).

Si l'on passe aux sols très évolués souvent profonds, on voit mal sous quelles formes peuvent se dissimuler calcium et magnésium. Il existe quelques minéraux magnésiens primaires qui résistent fort bien à l'altération, le talc par exemple et dans une moindre mesure la serpentine, mais ils sont en définitive assez localisés géographiquement. Par contre aucun minéral primaire comportant du calcium ne supporte une pédogenèse quelque peu énergétique comme c'est le cas en climat tropical humide.

Quant aux formes secondaires de réserve de ces deux éléments, la matière organique peut complexer le magnésium sous forme non échangeable (Salmon, 1963), mais les quantités extraites dans les oxisols de Sierra-Leone sont vraiment infimes par rapport à l'ensemble des réserves, bien qu'elles ne soient pas négligeables si on les compare au magnésium échangeable (Mokwunye et Melsted, 1972) (tableau II.3). On a montré également que le magnésium pouvait former des hydroxydes mixtes avec l'aluminium (Hunsaker et Pratt, 1970) ; en fait ces hydroxydes ne sont stables en laboratoire qu'en conditions alcalines (pH 8,2 à 8,5), à vrai dire exceptionnelles dans les sols tropicaux. Pourtant Jacob (1958) voit dans les hydroxydes de magnésium, simples ou complexes, la principale réserve magnésienne des sols, y compris après apport d'amendements magnésiens.

L'ion silicique (SiO_3^{--}) est également capable d'insolubiliser le magnésium sous forme de silicates insolubles, tant dans les eaux d'irrigation que dans les sols (Eaton *et al.*, 1968) ; mais comme cette combinaison se produit essentiellement à des pH allant de 7,5 à 9, il paraît peu vraisemblable qu'elle ait lieu avec intensité dans la majorité des sols tropicaux.

Au vu d'un certain nombre de travaux (cités par Salmon, 1963), les silicates du sol peuvent contenir du magnésium alors que minéralogiquement ils ne devraient pas en avoir ; en effet des substitutions permettent au magnésium de

remplacer partiellement l'aluminium dans leur réseau cristallin. Il est certain que ce phénomène joue dans le cas de l'illite, toujours présente bien que le plus souvent en très faible quantité, dans les sols ferrallitiques, et surtout pour la muscovite si fréquente dans les profils (on a vu précédemment, chap. I. § 1.1.4, que la muscovite arrivait à contenir 17 % de Mg selon Salmon, *op. cit.*).

Enfin on sait qu'en chimie classique, l'ion Mg s'échange avec l'ion fer avec une relative facilité dans les spinelles. Il serait intéressant de vérifier si les concrétions ferrugineuses, abondantes dans tant de sols des tropiques, n'ont pas également un peu de magnésium.

Si l'on peut ainsi faire un certain nombre d'hypothèses sur les combinaisons de corps dans lesquelles se dissimule le magnésium non échangeable du sol, on en est réduit pour le calcium à des suppositions où interviennent la complexation par la matière organique, des enrobements par les colloïdes, etc...

Cette question de la localisation dans le sol des réserves calciques (et magnésiennes) ne se pose pas dans les sols qui contiennent à faible profondeur des nodules ou concrétions de carbonate de calcium (et de magnésium), mais c'est éventuellement assez rare en climat tropical humide ou sub-humide.

C'est d'ailleurs un fait que les réserves calciques sont plus faibles proportionnellement et apparemment plus fragiles que les réserves magnésiennes.

4. — TRANSFORMATION DES RÉSERVES CALCIQUES ET MAGNÉSIENNES EN ÉLÉMENTS ÉCHANGEABLES CALCIUM ET MAGNÉSIUM LABILES

4.1. Définition et intensité de la transformation

On a constaté que, comme cela existe pour le potassium (Boyer, 1972 et 1973), les plantes peuvent s'alimenter partiellement à partir des réserves calciques et magnésiennes du sol lorsque ces éléments font défaut sous forme échangeable. Rice et Kamprath (1968), entre autres, ont observé que dans les sols des Coastal plains de Caroline du Nord (Etats-Unis), le maïs était capable d'utiliser le magnésium échangeable et non échangeable en quantités à peu près égales.

Bien qu'il soit prouvé que les racines arrivant au contact d'un minéral puissent l'attaquer suffisamment pour en extraire certains éléments (Barbier, 1962), on évoque habituellement une transformation lente des réserves en calcium et magnésium échangeables ; quant à l'intensité de ce phénomène son ordre de grandeur pour le magnésium serait de 0,17 milliéquivalent pour 100 g de sol lors d'une incubation de 90 jours en laboratoire à la fois pour des sols des Etats-Unis et des oxisols de Sierra Leone (Mokwunye et Melsted, 1973). On se doit d'ajouter qu'il s'agit de réserves formées à la suite d'un apport au sol de $MgCl_2$, ce qui laisse supposer une solubilité meilleure que dans la nature.

Il est toujours délicat, et parfois dangereux, de transposer au champ un résultat obtenu *in vitro* ; on peut tout de même en conclure à la lenteur d'une telle transformation. On a néanmoins cherché empiriquement, par diverses méthodes, à préciser les quantités de calcium et de magnésium susceptibles d'être utilisées par les plantes à plus ou moins longue échéance.

4.2. Méthodes permettant d'estimer calcium et magnésium assimilables à terme

Les auteurs, anglo-saxons surtout, ont tenté de définir, en plus des éléments échangeables, une fraction dite « difficilement échangeable », extractible aux acides dilués, soit acide nitrique dilué (méthode de Haylock, 1956), soit acide sulfurique dilué (méthode de Hunter et Pratt, 1956). Ils ont en outre caractérisé des éléments « fixés » extractibles aux acides forts, généralement par attaque du sol pendant 2 à 3 heures par de l'acide chlorhydrique 6N ou concentré.

Si ces méthodes furent largement appliquées au potassium, elles ne paraissent n'avoir que fort peu concerné le calcium et le magnésium. Toutefois Coulter (1972) signale que la majorité des sols à Hévéa de Malaisie ont entre 1 et 3 milliéquivalents de magnésium extractible à l'acide chlorhydrique 6N, les sols sur basalte et sur alluvions étant plus riches. Mokwunye et Melsted (*op. cit.*) ont extrait un magnésium « acide-soluble » par ébullition douce de 15 minutes dans de l'acide nitrique normal d'un sol préalablement débarrassé de ses bases échangeables (tableau II.3).

L'école française s'en tient généralement au calcium et au magnésium, improprement appelés « totaux », obtenus par ébullition pendant 5 heures d'un sol dans l'acide nitrique concentré. Cette méthode a permis à Fauck, Moureaux et Thomann (1969) de constater, dans les sols de Casamance, la faiblesse de la réserve calcique (1 à 2 me/100 g) contrairement à l'ampleur des réserves magnésiennes (13 à 14 me/100 g) et la diminution de ces réserves après 15 ans de culture, diminution peu significative pour le magnésium, mais très sensible pour le calcium qui tombe à 0,5 milliéquivalent pour 100 grammes de sol.

4.3. Calcium labile

Les procédés isotopiques, largement utilisés dans le cas du phosphore furent aussi parfois employés pour le calcium des sols en particulier.

Parmi les travaux récents, on peut citer ceux de Mazozera et Bouyer (1971) sur un sol ferrugineux tropical sableux du Niger et sur des sols sur gneiss et basalte de Madagascar, et de Dennis et Truong Binh (1974) sur les terres de Barre du Dahomey.

L'inconvénient de ce procédé réside dans la nécessité de prévoir un temps d'équilibration entre le calcium du sol et l'isotope marqué, variable mais parfois très long, uniquement pour retrouver le chiffre du calcium échangeable : une semaine pour le sol du Niger et le sol sur gneiss de Madagascar, mais une journée pour le sol sur basalte. La cause de cette variabilité reste mal connue ; les auteurs pensent qu'elle est probablement en relation avec la nature de colloïdes adsorbants et peut-être également avec des phénomènes d'enrobage de l'argile par de l'humus ou d'autres substances. Inconvénient supplémentaire, la valeur L de Larsen étudiée par Newbould et Russel (1963) et Dennis et Truong Binh (*op. cit.*) n'est pas stable si on ajoute au sol des nutriments minéraux (N.P.K.) qui favorisent la croissance des plantes.

Malgré ces difficultés, ces expériences permettent de se rendre compte qu'une partie des réserves calciques peut être utilisée à terme par les plantes dans une proportion non négligeable. Ainsi, dans l'expérience de Dennis et Truong Binh (*op. cit.*), 3 coupes de Ray-gras ont exporté en 12 semaines 585 ppm de calcium alors qu'il n'y avait au départ que 202 ppm de calcium échangeable.

TABLEAU II.3
 Fractionnement du magnésium
 dans quelques sols américains, africains et asiatiques,
 d'après Mokwunye et Melsted (1972)

Type de sol	Profondeur cm	Total mé/100 g	Magnésium		échangeable mé/100 g	organique mé/100 g
			minéral mé/100g	acido-soluble mé/100 g		
Etats-Unis Série Sable (Typic Haplaquoll)	0- 15	41,95	16,22	11,49	10,78	0,71
	15- 30	43,60	17,86	11,59	11,80	0,59
	30- 46	46,07	16,88	12,41	11,28	0,44
Série Cowden (Mollic Albaqualf)	0- 15	18,10	11,31	4,36	2,14	0,12
	15- 30	19,33	11,81	4,42	2,14	0,10
	30- 46	19,33	11,82	4,11	2,76	0,10
Série Tama (Typic Argiudoll)	0- 15	26,32	11,69	8,02	4,52	0,34
	15- 30	27,38	11,11	10,18	4,71	0,30
	30- 46	32,31	14,80	11,32	4,69	0,21
Série Cisne (Mollic Albaqualf)	0- 15	9,46	5,94	2,35	0,72	0,09
	15- 30	9,71	5,94	2,88	0,60	0,08
	30- 46	17,27	10,65	3,78	2,35	0,12
Sierra Leone Série Moa (Fluventic oxic Dystropept)	0- 15	6,99	4,11	2,22	0,30	0,12
	15- 80	6,99	4,72	1,65	0,12	0,07
	80-150	6,17	4,94	1,03	0,13	0,07
Série Pendembu (Tropectic Haplustox)	0- 18	3,29	2,47	0,82	0,17	0,07
	18- 45	3,21	2,47	0,60	0,13	0,06
	95-140	3,60	2,57	0,49	0,10	0,06
Série Benjema (Aquic Plinthic Haplustox)	0- 10	6,01	4,94	0,62	0,44	0,15
	10- 38	6,25	5,35	0,60	0,21	0,06
	38- 64	7,16	6,40	0,58	0,22	0,07
Série Mokondé (Plinthic Haplustox)	0- 13	5,96	4,11	0,80	0,37	0,10
	13- 38	7,82	6,17	0,66	0,13	0,06
	38- 76	9,05	8,02	0,66	0,10	0,07
	76-100	13,16	11,28	0,66	0,13	0,07
	100-150	11,52	10,58	0,49	0,12	0,06
Série Makent (Typic Haplorthox)	0- 25	3,29	1,01	0,99	1,11	0,16
	25- 50	3,50	2,20	0,82	0,23	0,10
	50-170	3,67	2,68	0,41	0,28	0,08

Suite du tableau p. 46.

Type de sol	Profondeur cm	Total mé/100 g	Magnésium		échangeable mé/100 g	organique mé/100 g
			minéral mé/100g	acido-soluble mé/100 g		
Série Tubum (Entic Oxic Dystropept)	0- 11	2,88	1,65	0,58	0,37	0,10
	11- 34	3,36	2,47	0,66	0,16	0,07
	34- 64	3,72	2,88	0,66	0,12	0,06
Série Bosor (Typic Humbriorthox)	0- 24	2,88	1,96	0,66	0,24	0,08
	24- 45	3,13	2,26	0,62	0,13	0,06
	45- 60	2,74	2,06	0,49	0,11	0,06
Série Mabassia (Entic Oxic Dystropept)	0- 17	3,18	2,06	0,90	0,74	0,12
	17- 63	3,53	2,47	0,74	0,25	0,07
	63- 99	2,56	1,85	0,49	0,19	0,06
Viet-Nam						
Phu Vink	0- 10	13,16	7,20	0,82	2,88	0,14
Sandy Loam	10- 24	11,11	6,98	0,62	2,67	0,11
(Eutric	24- 35	22,21	10,80	3,29	7,30	0,23
Xerochrept)	35- 50	27,97	12,34	4,94	9,46	0,40
	50- 70	19,33	6,99	6,17	5,97	0,49
	70- 90	23,86	7,82	6,79	6,84	0,46
Cal. San Clay (Dystric Humaquept)	0- 25	37,02	26,74	2,10	9,46	0,30
	25- 49	40,31	26,72	3,27	9,46	0,19
	49- 81	41,13	27,15	4,61	9,87	0,12
	81- 98	42,78	27,77	6,07	9,46	0,11
	+ de 98	48,54	27,97	9,67	12,75	0,13
Phu Vinh Loam (Eutric Xerochrept)	0- 19	13,88	9,05	4,11	0,82	0,07
	19- 32	9,46	7,40	1,03	0,80	0,07
	32- 45	9,05	7,40	1,32	0,64	0,06
	45- 61	10,69	8,23	1,23	0,64	0,06
	61- 76	11,52	9,05	2,47	0,58	+0,08
	76- 99	13,16	9,05	2,55	0,82	0,06
Red Yellow Podzolic (ultisol)	0- 24	20,16	13,56	4,28	0,95	0,13
	24- 36	13,16	9,85	1,65	0,58	0,16
	36- 60	13,16	10,87	1,15	0,61	0,14
	60-100+	15,63	12,69	1,48	0,70	0,16
Old Aluvium (Alfisol)	0- 13	3,21	2,29	0,49	0,40	0,05
	13- 21	4,36	3,94	0,58	0,54	0,07

5. — FRACTIONNEMENT DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DES SOLS TROPICAUX

Mokwunye et Melsted (1972), étudiant des sols des Etats-Unis, de Sierra Leone et du Viet-Nam, ont proposé pour le magnésium le fractionnement suivant :

– Magnésium total : attaque à l'acide perchlorique (HClO_4) à 70 % suivant la méthode proposée par Jackson (1).

– Magnésium échangeable : extraction à l'acétate d'ammonium normal et neutre (20 ml de réactif par gramme de sol pendant 40 à 80 minutes).

– Magnésium complexé avec la matière organique : on oxyde avec de l'eau oxygénée à 10 %, le résidu de l'extraction précédente et on mesure, après centrifugation, le magnésium solubilisé après une nouvelle extraction à l'acétate d'ammoniac.

– Magnésium acido-soluble : le résidu est repris, en ébullition douce, par de l'acide nitrique N (30 ml par gramme de sol) pendant 15 minutes, et on lave ensuite le résidu par de l'acide nitrique 0,2 N.

– Magnésium minéral : le résidu, transféré dans un bécher, est mis à digérer à chaud dans un mélange d'acides forts (nitrique, chlorhydrique, phosphorique). On reprend ensuite par HCl 5N.

Pour être complet, il faudrait ajouter le magnésium contenu dans la solution du sol ; comme il est toujours en équilibre plus ou moins instantané avec le magnésium échangeable, on a l'habitude de le confondre avec ce dernier.

Il doit être possible d'appliquer au calcium un tel fractionnement, mais peu d'auteurs semblent l'avoir fait. Quoiqu'il en soit, les agronomes s'attachent surtout à deux données essentielles, éléments échangeables et éléments totaux, la différence formant la réserve calcique et magnésienne des sols dont une partie est éventuellement utilisable à terme par les plantes.

6. — DÉTERMINATION DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM TOTAUX

On ne peut obtenir la totalité de ces deux éléments que par attaque par des réactifs énergiques : acide perchlorique, fusion alcaline, mélange fluo-perchlorique.

Pour les sols ferrallitiques évolués dans lesquels il ne reste plus aucune trace de roches ni de minéraux primaires, l'attaque à chaud dite aux « trois acides » (chlorhydrique, sulfurique, nitrique) communément employée en pays francophones (2) est généralement suffisante, le résidu se composant alors uniquement de quartz blanchi ; sinon, on reprend ce résidu par le réactif fluo-perchlorique qui achève l'extraction.

Ces méthodes ont l'inconvénient d'être longues, délicates (3) et parfois même dangereuses (attaque fluo-perchlorique). En outre, elles extraient la totalité des éléments minéraux du sol, y compris ceux qui, inclus dans des morceaux de roche-mère, ne peuvent aisément servir à la nutrition des plantes.

(1) Jackson (1968) : « Soil chemical analysis ».

(2) Méthode très voisine dans son principe de l'attaque aux trois acides de Jackson (acides nitrique, phosphorique, chlorhydrique) préconisée par Mokwunye et Melsted.

(3) Il est assez fréquent que les chiffres de calcium total obtenus après attaque aux trois acides soient discutables, parce qu'apparemment trop élevés.

Aussi, les agronomes ont-ils cherché des tests plus rapides, plus simples, qui donneraient un ordre de grandeur des réserves du sol utilisables à échéance. On a déjà indiqué que l'école française utilise l'attaque nitrique (on fait bouillir le sol dans un large excès d'acide nitrique concentré pendant 5 heures) et donne improprement l'appellation d'« éléments totaux du sol » aux produits obtenus par cette analyse (on ne saurait trop mettre en garde les lecteurs non avertis qui consultent la littérature francophone des pays tropicaux contre cette domination abusive mais passée dans le langage courant). L'inconvénient de cette méthode est que le résultat dépend dans une certaine mesure des conditions d'attaque et n'est pas toujours aisément reproductible ; c'est d'ailleurs plus vrai pour le potassium que pour le calcium et le magnésium.

A ce type de test se rattachent les attaques du sol à chaud (ou plus rarement à froid) par les acides chlorhydrique, sulfurique ou nitrique, méthodes surtout utilisées par les auteurs anglo-saxons pour l'extraction du potassium, mais qui peuvent s'appliquer également au calcium et au magnésium comme le rapporte Coulter (1972) à propos des sols de Malaisie.

En ce qui concerne le magnésium, le résultat final doit s'apparenter, en première approximation, à la fraction acido-soluble de Mokwunye et Melsted (*op. cit.*) (cf. tableau II.3 et § 5).

7. — DÉTERMINATION DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM ÉCHANGEABLES

Il existe en gros deux types de méthodes : l'extraction par l'acétate d'ammoniac et l'extraction par les acides dilués.

7.1. Extraction par les acides dilués

— L'acide chlorhydrique dilué fut utilisé longtemps au Zaïre pour la détermination rapide de la somme des bases échangeables, un titrage par la soude permettant de connaître l'acidité neutralisée par les bases du sol. Malheureusement l'acide chlorhydrique extrait aussi du fer et de l'aluminium en même temps que les bases alcalines et alcalino-terreuses, d'où l'inconvénient d'une erreur systématique par excès.

— Le mélange d'acide sulfurique et chlorhydrique dilué (H_2SO_4 , 0,025N + HCl 0,1N) préconisé par la North Carolina University est actuellement très employé en Amérique du Sud et en particulier au Brésil. Comme précédemment, on extrait une certaine quantité de fer et d'aluminium, ce qui est ici sans importance du fait que tous les éléments sont dosés séparément.

Robinson et Semb (1968) ont ajouté à cette liqueur d'extraction du charbon actif sans qu'apparemment les résultats obtenus sur les sols de Tanzanie subissent des modifications bien nettes.

— Le mélange acide acétique - lactate de NH_4 , mis au point pour l'Europe du Nord (Egner, Riehm, Domingo, 1960), fut transporté en Tanzanie par Robinson et Semb (*op. cit.*) sans qu'il y manifeste une supériorité quelconque sur les autres méthodes ; au contraire même, la faiblesse des quantités extraites rend assez délicate l'interprétation des résultats.

7.2. Extraction par l'acétate d'ammonium neutre et normal

C'est la méthode la plus utilisée et qui sert de référence à toutes les autres, à tel point qu'une détermination de bases échangeables mentionnée sans indication d'un procédé analytique précis est à coup sûr effectuée à l'acétate

d'ammonium. Cette méthode tend à se généraliser et à supplanter toutes les autres. Il suffit pour s'en rendre compte de consulter la littérature récente concernant la chimie des sols.

On lui a prêté un défaut pour la détermination du calcium et du magnésium des sols : en effet, elle peut extraire ces éléments à partir de minéraux en voie d'altération lorsque la destruction de l'édifice cristallin est assez avancée pour qu'ils n'y soient plus retenus que par des liaisons du type valence. Un agronome pourra penser que cette distinction est bien subtile : ce calcium et ce magnésium, ayant alors toutes les caractéristiques chimiques des éléments échangeables des colloïdes, devraient être tout aussi accessibles aux plantes.

En fait, le principal inconvénient de l'utilisation de l'acétate d'ammonium neutre et normal tient à sa neutralité ; les sols traités le sont à pH7 quel que soit leur pH réel *in situ* ; du fait de la diminution des charges électro-négatives des colloïdes amphotères (kaolinite, matière organique...) au fur et à mesure que le pH s'abaisse, la détermination de la capacité d'échange que l'on fait habituellement en même temps que la mesure des cations échangeables présente une erreur par excès dans les sols acides, erreur qui peut être importante lorsque les sols sont au voisinage de point iso-électrique (pH voisins de 4 pour les sols à kaolinite). Pour remédier à ceci, on tamponne parfois l'acétate d'ammoniac au pH du sol.

Quelle que soit cette « erreur » sur la capacité d'échange, elle n'a aucune incidence sur l'extraction et la mesure des cations échangeables.

8. — CONCLUSION

Si l'on s'en tient à la séparation classique entre calcium et magnésium échangeables d'une part, non échangeables ou de réserve d'autre part, on est amené à formuler pour les sols des pays tropicaux un certain nombre de constatations d'ordre général.

1° La capacité de sorption des bases par le complexe d'échange est habituellement assez basse. Ceci est dû en particulier à la dominance quasi générale des argiles kaolinitiques dans la majorité de ces sols, encore qu'il faille faire une différence entre kaolinite *sensu stricto* et halloysite.

Il existe évidemment des exceptions dont les plus notables sont les sols à allophanes (andosols) et les sols à montmorillonite dominante (vertisols, sols bruns eutrophes) ou à mélange illite-montmorillonite-kaolinite (sols ferralsitiques).

A noter que la matière organique introduit une forte capacité d'échange supplémentaire proportionnelle à ses teneurs dans les sols.

2° La saturation du complexe absorbant par le calcium est extrêmement variable : elle peut aller dans les sols ferrallitiques de 1 % à 90 % par exemple. Mais les cas de désaturation avancée sont fréquents sous climat humide, même en l'absence de cultures continues.

3° Si les réserves en magnésium des sols (Mg non échangeable) sont habituellement importantes, le calcium non échangeable apparaît lui, dans beaucoup de cas, faiblement représenté par rapport à sa fraction échangeable.

4° On n'a en définitive que fort peu de données sur l'intensité de la transformation de Ca et Mg des « réserves » en Ca et Mg échangeables. Malgré tout, il semble que les réserves calciques des sols pédologiquement évolués soient plus facilement mobilisables, mais s'épuisent plus vite, que les « réserves » magnésiennes dès qu'il y a culture.

**Teneurs de quelques sols
en calcium et magnésium échangeables et totaux**

I. — Bases totales déterminées après attaque aux trois acides. Bases échangeables par extraction à l'acétate d'ammoniac neutre et normal (sur sol tamisé à 2 mm)

in Eschenbrenner (V.) et Badarello (L.), 1975. Notice explicative de la carte des paysages morphopédologiques. Feuille d'Odienné à 1/200 000. Côte d'Ivoire. Doc. O.R.S.T.O.M., Côte l'Ivoire, 96 p.

	Profondeur en cm	Ca échang. mé/100 g	Ca total mé/100 g	Mg échang. mé/100 g	Mg total mé/100 g
Vertisol	0- 10	9,99	n.d.	21,5	n.d.
	30- 40	9,99	16,1	25,3	115,0
	80-100	18,8	57,1	34,9	125,0
Sol brun eutrophe peu évolué	0- 15	10,4	n.d.	18,4	n.d.
	30- 50	8,98	30,0	14,9	247,0
	100-120	13,5	55,0	28,4	390,0
	180-200	9,48	11,7	8,3	95,0
Sol ferrallitique remanié modal	0- 10	0,18	n.d.	0,54	n.d.
	15- 20	0,45	n.d.	0,30	n.d.
	50- 70	0,51	0,90	0,24	7,30
	160-180	0,72	0,85	0,15	7,00
Sol ferrallitique remanié induré	0- 10	9,18	n.d.	3,42	n.d.
	20- 30	0,93	n.d.	0,33	n.d.
	30- 50	0,30	0,50	0,09	10,5
Sol ferrallitique remanié faiblement appauvri (en argile)	0- 8	2,38	n.d.	1,52	n.d.
	15- 30	0,51	n.d.	0,68	n.d.
	50- 70	0,16	0,62	0,32	4,95
	130-160	0,18	0,67	0,36	12,8
	200-210	0,13	0,92	0,22	8,05
	290-310	0,13	0,82	0,12	5,90
Sol ferrallitique appauvri (en argile) modal	0- 10	3,30	n.d.	1,44	n.d.
	35- 45	1,44	n.d.	0,66	n.d.
	65- 75	1,35	2,00	0,60	0,45
	140-160	1,40	1,55	0,36	5,20
	250-280	1,20	1,20	0,15	4,30
Sol ferrallitique appauvri (en argile) hydromorphe	0- 10	0,90	n.d.	0,30	n.d.
	30- 60	0,50	n.d.	0,22	n.d.
	70- 90	0,60	1,35	0,15	6,00
	120-140	0,65	1,70	0,20	5,20
	200-220	0,70	1,60	0,24	5,20

	Profondeur en cm	Ca échang. mé/100 g	Ca total mé/100 g	Mg échang. mé/100 g	Mg total mé/100 g
Sol ferrallitique rajeuni, avec érosion et remaniement	0- 10	2,39	n.d.	1,28	n.d.
	25- 35	0,74	n.d.	0,58	n.d.
	50- 70	1,24	1,92	1,04	8,10
	110-130	0,49	1,07	0,68	7,25
	180-200	0,31	1,37	0,20	9,30
Sol ferrallitique typique faiblement rajeuni	0- 10	2,94	n.d.	1,37	n.d.
	40- 60	0,84	1,42	0,45	14,8
	100-120	1,21	1,42	0,45	9,95
	170-190	0,76	1,12	0,37	12,5
Sol ferrallitique typique faiblement remanié	0- 10	3,99	n.d.	1,81	n.d.
	20- 30	1,64	n.d.	1,04	n.d.
	50- 70	1,24	1,37	0,81	7,25
	130-150	1,09	1,12	0,45	6,25
Sol hydromorphe minéral à gley	0- 15	3,30	n.d.	1,05	n.d.
	25- 35	0,75	2,80	0,39	8,35
	80-100	2,60	6,05	1,16	9,00
Sol hydromorphe minéral à pseudo-gley	0- 10	0,58	n.d.	0,14	n.d.
	20- 30	0,03	n.d.	0,04	n.d.
	45- 55	0,05	0,85	0,06	13,5
	80-100	0,05	0,60	0,04	10,5
	140-160	0,06	0,75	0,10	8,3

II. — Bases totales déterminées après attaque à l'acide nitrique concentré et bouillant. Bases échangeables par extraction à l'acétate d'ammoniac neutre et normal (sur sol tamisé à 2 mm).

a) Côte d'Ivoire *in* Roose (E.J., Jadin (P.), 1963. Erosion, ruissellement et drainage oblique sur un sol à cacao de moyenne Côte d'Ivoire. Station I.F.C.C. près de Divo. I - Milieu, dispositif et résultat des campagnes 1967-1968. Rapport O.R.S.T.O.M.-I.F.C.C. (Abidjan), 76 p. ronéo.

	Profondeur en cm	Ca échang. mé/100 g	Ca total mé/100 g	Mg échang. mé/100 g	Mg total mé/100 g
Sol ferrallitique moyennement désaturé	0- 10	11,07	14,25	2,90	5,02
	1- 10	1,95	2,72	1,60	4,32
	20- 50	0,90	1,28	0,68	2,84
	50- 65	1,11	1,26	0,65	2,58
	80-100	0,28	0,53	0,66	1,68
	125-135	0,13	0,21	0,651	2,02
	175-200	0,08	0,86	0,33	1,28
	240-260	0,10	0,53	0,18	2,04

b) Congo, Vallée du Niari in *Boissezon* (P. de), 1967. Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari. I - Etude pédologique de la vallée du Niari. O.R.S.T.O.M. (Paris) Edit., 188 p.

	Profondeur en cm	Ca échang. mé/100 g	Ca total mé/100 g	Mg échang. mé/100 g	Mg total mé/100 g
Sol ferralitique fortement désaturé modal	0-10	1,95	3,0	0,17	0,75
	70	0,11	1,1	traces	1,17

Importance du calcium et du magnésium du sol pour les plantes cultivées. Rôle du pH

1. — FAIBLES BESOINS ÉLÉMENTAIRES DES PLANTES EN CALCIUM ET MAGNÉSIUM

Lorsqu'on analyse un organisme végétal, on retrouve, pour peu que l'analyse soit fine, tous les éléments ou presque de la classification périodique de Mendeleïef.

Une distinction didactique veut que l'on sépare les macro-éléments carbone, oxygène, hydrogène, azote, phosphore, potassium et même soufre des oligo-éléments qui ne sont présents qu'en faible quantité tels le bore, le manganèse, le fer, le cuivre, le zinc, le molybdène, l'aluminium, le plomb, l'arsenic, etc... Le calcium et le magnésium se trouvent, comme la silice, à la charnière de ces deux catégories.

Cela paraît assez bien justifié dans le cas du *calcium*, pour lequel les besoins élémentaires des plantes sont très faibles : 0,04 ppm de calcium suffisent en solution nutritive pour que les divisions cellulaires s'effectuent normalement dans les racines de blé et 0,40 ppm pour qu'il y ait élongation des cellules formées dans ces racines (Burstrom, 1952) ; un minimum de 16 mg de calcium par litre assure une croissance normale à la tomate en culture hydroponique, avec un optimum compris entre 31 et 64 milligrammes de Ca (Larson *in* Demolon, 1968). D'autre part, Malavolta (1967) affirme que les plantes cultivées ne consomment guère en moyenne que 25 kilogrammes de calcium par hectare, sauf les légumineuses qui en absorbent quatre fois plus.

Il est notoire, en outre, que les besoins en calcium sont infimes pour les algues et certains micro-organismes, très faibles pour les gymnospermes, mais un peu plus élevés chez les plantes supérieures, la teneur en calcium de leurs feuilles variant de 0,2 à 5 % de leur poids sec, ce qui est encore assez peu (Wallace, Frolich et Lunt, 1966).

Et pourtant les plantes accumulent d'importantes quantités de calcium ; à titre d'exemple, l'hévéa, âgé de 33 ans, plante particulièrement acidophile et

calcifuge, concentre dans ses tissus 3 351 kilogrammes de calcium par hectare, à peine moins que d'azote et de potassium (respectivement 4 012 et 4 428 kg/ha) et bien plus que de phosphore (1 059 kg/ha) et de magnésium (923 kg/ha) (Shorrocks, 1965 b).

Il y a donc une contradiction apparente entre des besoins élémentaires apparemment faibles et ces fortes accumulations de calcium dans le végétal.

Le magnésium est aussi souvent considéré comme un semi-oligo-élément : Wallace et *al.* (*op. cit.*), observent que du maïs et du tabac se développent normalement en solution nutritive pourvu que leurs feuilles contiennent au moins 0,03 % de magnésium par rapport à leur poids sec. Mais leurs conclusions changent dès que l'on passe au champ : dans le cas du tabac une teneur dix fois supérieure de magnésium est alors considérée comme un minimum, un seuil critique, au-dessous duquel on ne peut espérer de rendements convenables. Comme pour le calcium il existe donc une disproportion entre des besoins élémentaires minimes, tels qu'ils apparaissent en culture artificielle, et la nécessité pour le végétal d'absorber des quantités bien supérieures lorsqu'il se trouve dans son milieu normal, le sol. Si on ajoute à cela l'important rôle physiologique du magnésium (1), on comprend que Jacob (1958) ait qualifié ce cation de « cinquième élément majeur pour la nutrition des plantes ».

2. — ROLE PLASTIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNESIUM

Le magnésium

C'est l'un des constituants de la chlorophylle : 2,7 % de Mg en poids dans la molécule, ce qui, rapporté au poids sec de la feuille, représente entre 10 et 30 milligrammes pour 100 g (moyenne calculée sur 22 espèces végétales par Javillier et Goudshaux, 1940). Or ce qui existe dans la chlorophylle ne dépasse guère 10 % du magnésium total contenu dans les parties vertes du végétal (Zimmermann, 1947), bien que l'on ait relaté des proportions quelque peu différentes (Javillier et Goudshaux, *op. cit.*).

Ce corps fait aussi partie des édifices moléculaires de la phytine et de la pectine (Demollon, 1968), mais la plus grande part se trouve dissoute dans les sucs cellulaires où il est particulièrement mobile et disponible (Jacob et Von Uexkull, 1960). On peut noter qu'il existe en abondance dans les tissus jeunes en voie de croissance et dans les organes reproducteurs, fleurs et graines surtout ; d'où l'importance des exportations de magnésium lors des récoltes de céréales.

Le calcium

Le calcium, par contre, ne paraît avoir qu'une fonction plastique réduite : il entre dans la composition des pectines des membranes cellulaires dont il assure la rigidité (Jacob et Von Uexkull, *op. cit.*).

Comme le magnésium, le calcium est présent dans les sucs cellulaires où il semble d'ailleurs être peu mobile, bien qu'une bonne partie soit soluble à l'eau (40 % du calcium total pour la luzerne, 60 % pour le chou selon Demollon, 1968). Dès qu'il est en excès, il s'insolubilise en cristaux d'oxalate de calcium dont le rôle, peut être passif, reste mal élucidé malgré leur abondance dans certaines espèces végétales. C'est dans le bois que l'on trouve le plus de calcium

(1) Se reporter plus loin au paragraphe 3.2. de ce chapitre.

(en moyenne dans les cendres 75 % de CaO chez les angiospermes, 20 à 30 % chez les conifères) où il s'accumule avec l'âge, ainsi que dans les parties vertes des végétaux (Demolon, *op. cit.*).

Contrairement à ce qui se passe pour le magnésium, il est mal représenté dans les graines ; celles-ci contiennent peu de calcium : 0,028 % de CaO contre 0,18 % de MgO dans les grains de mil pennisetum (Bertrand et *al.*, 1972). Il en est de même pour les pépins des citrus (Wallace, 1954).

Si le rôle plastique du calcium et même du magnésium est de toute évidence assez réduit par rapport à celui de l'azote par exemple, leurs fonctions physiologiques dans le métabolisme de la plante apparaissent au contraire fort importantes à plusieurs titres.

3. — ROLE PHYSIOLOGIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNESIUM

3.1. Le calcium

On a souvent considéré que l'un des rôles essentiels dévolus au calcium consistait en la neutralisation de l'acidité développée par un certain nombre d'acides organiques et à l'insolubilisation de ces acides, matérialisée en particulier par la formation des cristaux d'oxalate (Demolon, 1968). Mais il semble bien que l'action physiologique du calcium ne se limite pas à cela.

La synthèse de divers travaux faite par Singh et Sharma (1972) permet de préciser divers points : une carence en calcium sur des plantes cultivées en solution nutritive provoque les effets suivants :

- une diminution de la croissance attribuée à une inhibition du mécanisme de la division cellulaire ;
- une mauvaise mobilité des hydrates de carbone, d'où leur accumulation dans les feuilles ;
- une diminution de l'absorption des cations monovalents, potassium et sodium, et, parallèlement, une augmentation nocive des cations divalents, magnésium surtout.

A ceci, ces auteurs ajoutent que, dans le cas de la tomate qu'ils ont étudié spécialement, un déficit en calcium entraîne une mauvaise transformation de l'azote minéral en acides aminés.

Autre fonction importante du calcium : son rôle dans l'économie de l'eau ; il ralentit son absorption et favorise la transpiration, se présentant ainsi comme l'antagoniste du potassium. D'où un mécanisme de régulation dont le bon fonctionnement dépend d'un rapport convenable K/Ca à l'intérieur de la plante (Demolon, 1968).

Dans cette énumération des interventions du calcium dans la physiologie de la plante, il semble qu'il faille insister sur les équilibres ioniques auxquels il contribue au même titre que les autres ions minéraux, non seulement à l'intérieur des cellules mais au niveau des racines où il règle l'absorption des ions en proportion convenable. En son absence, le magnésium, le cuivre, l'aluminium, etc., sont absorbés en quantités excessives et deviennent vite toxiques, d'où de graves répercussions sur les rendements des cultures ; à titre d'exemple un déficit en calcium induit chez l'arachide la maladie des « gousses vides » (Gouny et Prévot, 1948 ; Watson, 1964).

Et c'est peut-être parce que les solutions nutritives ont par définition une balance ionique calculée au plus juste que le calcium peut n'y être présent qu'à

faible teneur. Les solutions du sol, elles, sont en équilibre avec les divers cations échangeables dont les proportions relatives varient fortement selon l'état de saturation du milieu.

La prédominance de l'ion calcium dans le sol et ses solutions paraît une nécessité en raison de sa faible mobilité qui contraste avec l'« agilité » à l'intérieur des tissus végétaux montrée par le magnésium et surtout le potassium, ses principaux antagonistes.

Toutefois en large excès dans le sol, surtout s'il s'agit de carbonates, il peut être nocif en induisant des chloroses par insolubilisation du fer.

3.2. Le magnésium

On a vu précédemment (parag. 2) que les fonctions plastiques du magnésium ne justifiaient pas les importantes quantités de cet élément que l'on trouve dans l'organisme végétal ; celui-ci a besoin, en effet, de magnésium lors des réactions chimiques qui se produisent au niveau des cellules (Jacob et Van Uexhull, 1960).

Les trois rôles physiologiques principaux du magnésium furent définis par Zimmermann (1947), entre autres, qui en a donné un aperçu synthétique :

- une fonction photosynthétique directement liée à la présence de magnésium dans la chlorophylle. Une carence magnésienne entraîne de ce fait une chlorose internervienne ; chez le bananier la maladie dite du « Bleu » en est la manifestation (Brun et Champion, 1953) ;

- une fonction de translocation du phosphore : le magnésium est indispensable à la mobilité du phosphore dans la plante ; il préside ainsi à la formation des phospho-lipides et des nucléoprotéines des cellules (Demolon, 1952). Ainsi le trouve-t-on en abondance dans les tissus jeunes et les organes reproducteurs : méristèmes terminaux des bourgeons, fleurs, fruits, graines...

- une fonction dans le métabolisme des glucides ; il semble que ce soit Raumer (1883) qui le premier reconnut l'importance du magnésium dans le transfert des hydrates de carbone de la feuille aux autres organes de la plante. Malgré les travaux de nombreux chercheurs, on ne sait trop si l'action du magnésium sur la transformation de l'amidon en sucre est directe ou si elle s'effectue par l'intermédiaire du phosphore. Quoiqu'il en soit, une carence magnésienne induit une accumulation de produits amylicés dans les tissus foliaires.

Outre ces trois fonctions principales, il est vraisemblable que le magnésium intervient d'une façon ou d'une autre dans la formation de toutes les protéines (Malavolta, 1967), vraisemblablement par effet enzymatique.

De cet exposé, on peut conclure à l'importance primordiale du magnésium dans la genèse des tissus végétaux, surtout les plus jeunes. Aussi, au contraire du calcium, qui s'accumule dans les tissus âgés (bois, feuilles adultes) a-t-il tendance, lorsque la plante vieillit, à se concentrer dans les fruits et graines. Cette migration, déjà mise en évidence il y a un siècle en Hongrie (Dempwolf, 1869), fut largement vérifiée par la suite (Willstater, 1909 ; Demolon, 1968).

Pour être complet, il faut ajouter que le magnésium a, comme le calcium, un rôle régulateur dans l'absorption d'autres ions, en particulier pour celle du potassium.

3.3. Les équilibres cationiques chez les plantes

On a déjà souligné l'importance des équilibres cationiques dans les sucres végétaux à propos du rôle antitoxique et régulateur du calcium. Mais ceci

s'inscrit dans un contexte plus large, magistralement défini par Martin-Prevel et Montagut (1966) qui écrivent notamment à propos du bananier : « Parmi les cinq éléments majeurs, le calcium, le magnésium et le potassium constituent la famille chimique très homogène des alcalins et alcalino-terreux. Très proches les uns des autres dans la classification périodique des corps simples, ils demeurent dans les végétaux à l'état d'ions même quand ils sont accouplés à des radicaux organiques (comme le calcium à l'état de pectate) ; de ce fait, ils sont susceptibles de se substituer les uns aux autres dans leur métabolisme, dans la mesure où les différences d'affinités chimiques le permettent et avec les conséquences favorables ou défavorables que cela entraîne pour la plante... il faudrait ajouter (à ces trois cations) le sodium s'il n'était chez le bananier à l'état de traces... ».

Il semble en effet prouvé que la plante tend à posséder une somme de cations $Ca + Mg + K + Na$ constante même lorsque le milieu nutritif est déséquilibré. Toutes les substitutions sont théoriquement possibles : c'est ainsi que le magnésium peut remplacer le calcium et le potassium et réciproquement (Martin-Prevel et Dugain, 1962), tandis que sodium et potassium sont relativement interchangeable (Demolon, 1968 ; Morard *et al.*, 1974), etc... En fait, il faut aussi tenir compte des différences de mobilité de chacun de ces ions : ainsi en pénétrant dans une racine, le potassium, très mobile, aura plus de chance de rencontrer une molécule organique « accepteuse » que le magnésium moins « agile » et surtout le calcium dont l'ion est relativement inerte (Martin-Prevel et Dugain, *op. cit.*).

Il va sans dire que le métabolisme de la plante supporte mal ces substitutions dès qu'elles atteignent une certaine ampleur (1) en raison du rôle spécifique de chaque cation. De ce fait les racines, croissant dans un milieu nutritif très déséquilibré, ne peuvent arriver à rétablir les proportions les plus favorables à l'organisme végétal et elles ont tendance à absorber préférentiellement le cation qui se trouve le plus facilement à leur disposition.

D'où l'importance des équilibres cationiques dans le sol, question qui sera largement développée dans le chapitre IV consacré à ces équilibres.

4. — IMPORTANCE QUANTITATIVE DE LA MOBILISATION DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DU SOL PAR LES PLANTES CULTIVÉES

Le tableau III.1 s'efforce de répertorier, sans prétendre à une quelconque exhaustivité, les quantités de calcium et de magnésium contenues dans un certain nombre de plantes cultivées. Il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur, car la précision apparente des chiffres ne doit pas faire illusion. Suivant les auteurs, ces données présentent une variabilité certaine non seulement parce qu'elles ne sont pas toutes homogènes et que les analyses sont parfois délicates à effectuer surtout lorsqu'il s'agit d'arbres ou de parties souterraines, mais aussi parce que divers facteurs influent largement sur le contenu minéral de plantes exprimé à l'hectare ou par quintal (ou tonne) de matière végétale (2).

(1) A titre d'exemple, un rendement convenable du palmier à huile nécessite des rapports Ca/Mg et Ca/K égaux ou légèrement supérieurs à 2 dans les feuilles (Surre et Ziller, 1968).

(2) Suivant le lieu où il est cultivé, le riz des rizières de Madagascar peut contenir dans le grain et la paille des quantités de calcium et de magnésium variant du simple au double (Velly, 1967).

4.1. Le développement du végétal et le rendement

Il est logique que les cotonniers du Nicaragua à la végétation exceptionnellement dense et haute, 2 mètres, et au rendement non moins exceptionnel, 4 053 kg de coton graines à l'hectare (Richard, 1974), absorbent à l'hectare des quantités de calcium (92,5 kg) et de magnésium (17,4) bien supérieures à celles d'une culture à rendement pourtant honorable (1 244 kg/ha de coton graines) faite au Bénin, soit 15,0 de Ca et 6,4 kg/ha de Mg, même si dans le deuxième cas il n'est pas tenu compte des racines (Deat et al., 1976).

4.2. Les teneurs en éléments minéraux du sol et la fumure

La plante couvre d'abord ses besoins élémentaires ; puis, si elle trouve en abondance des nutriments minéraux, elle développe une consommation de luxe sans rapport avec ses nécessités physiologiques (Specht, 1960). Ainsi la canne à sucre poussant aux Hawaï dans un sol fertile abondamment fumé, contient 0,31 kg de Ca et 0,25 kg de Mg par tonne de canne usinable alors qu'en Louisiane elle n'a que 0,12 kg de Ca et 0,20 kg de Mg toujours par tonne de canne usinable (Fauconnier et Tessereau, 1970).

TABLEAU III.1

Calcium et magnésium immobilisés à partir du sol par quelques plantes cultivées tropicales, en kilogrammes d'éléments par hectare

Plante (Localisation)	Rendement	Organes	Ca kg/ha	Mg kg/ha	Sources	Observations
Racines et tubercules						
Manioc <i>Manihot utilissima</i> (Madagascar)	40 000 kg/ha (racines)	Racines	33,6	53,7	Cours et <i>al.</i> (1961)	Parties comestibles seulement
Manioc <i>Manihot utilissima</i> (Madagascar)	40 000 kg/ha (racines)	Racines	14,28	43,2	Velly (1967)	Parties comestibles seulement
Patate douce <i>Ipomea patatas</i> (Madagascar)	20 000 kg/ha (tubercules)	Tubercules	10,0	26,4	Velly (1967)	Parties comestibles seulement
Pommes de terre- <i>Solanum tuberosum</i> (Madagascar)	30 000 kg/ha (tubercules)	Tubercules	3,57	22,2	Velly (1967)	Parties comestibles seulement
Graminées alimentaires						
Maïs - <i>Zea Mays</i> (U.S.A.)	9 400 kg/ha (grains)	Plante entière dont grains	39 1,5	45 11	Barber et Olson (1968)	Rendement très important
Maïs - <i>Zea Mays</i> (Madagascar)	8 000 kg/ha (grains)	Paille Grains	14,28 3,57	6,60 9,60	Velly (1967)	Parties aériennes seulement

Plante (Localisation)	Rendement	Organes	Ca kg/ha	Mg kg/ha	Sources	Observations
Mil - <i>Pennisetum typhoides</i> (Niger)	1 785 kg/ha (grains)	Grains Panicules Pailles Total parties aériennes	0,35 1,21 14,35 15,81	1,98 2,94 15,06 18,98	Bertrand Nabos et Vicaire (1972)	Racines non comptabilisées
Riz - <i>Oryza sativa</i> (Madagascar)	6 000 kg/ha (grains)	Grains Paille	2,52 15,42	9,6 17,4	Velly (1967)	Parties aériennes seulement
Riz - <i>Oryza sativa</i> (Extrême Orient)	2 500 kg/ha (grains)	Plante entière dont panicules	18 6,5	13,2 4,7	De Geuss (1973)	
Sorgho - <i>Sorghum vulgare</i> (Nord Cameroun)	3 500 kg/ha (grains)	Panicules et graines Paille Total parties aériennes	0,2 8,1 8,3	4,8 6,3 11,1	Deat et <i>al.</i> (1976)	Parties aériennes seulement
Légumineuses alimentaires						
Arachide <i>Arachis hypogea</i> (Sénégal)	1 276 kg/ha gousses dont 893 de graines	Fanes Graines Coques Total	11,57 0,55 0,36 12,48	7,99 1,82 0,30 10,11	Gillier et Sylvestre (1969)	Parties aériennes seulement
Arachide <i>Arachis hypogea</i> (Bénin)	2 721 kg/ha (gousses)	Fanes Gousses Total	17,3 1,4 18,7	9,6 2,3 11,9	Deat et <i>al.</i> (1976)	Parties aériennes seulement
Voandzeia (Madagascar)	3 000 kg/ha (gousses)	Gousses	6,42	10,2	Velly (1967)	Gousses seulement
Cultures de rente (dites industrielles)						
Ananas (Guinée)	55 000 kg/ha (fruits)	Plante entière dont fruits	86,4 12,1	25,2 6	Martin- Prevel cité PY (1965)	
Bananiers (Antilles)	30 000 kg/ha (régimes)	Plante entière y compris ra- cines et régimes	142	60	Montagut et Martin Prevel (1965)	
Cacoyers 30 ans (Cameroun)		Parties aériennes Fruits	5,5 5,8	1,5 4,8	Boyer (1973)	

Plante (Localisation)	Rendement	Organes	Ca kg/ha	Mg kg/ha	Sources	Observations
Canne à sucre (Louisiane)	150 tonnes/ha canne usinable	Canne usi- nable	18,0	30,0	"in" Fauconnier et Bessereau	
		Tête et feuilles	102,0	48,0		
		Souches et racines	19,5	13,5		
		Total	139,5	91,5		
Canne à sucre (Hawaï)	250 tonnes/ha canne usinable	Canne usi- nable	77,5	62,5	"in" Fauconnier Bessereau (1970)	Parties expor- tées seulement
Cocotier (<i>Cocos nucifera</i>) (Extrême-Orient)	7 000 noix par an et par hectare	Noix	16,4	22,8	De Geuss (1973)	Exportations seulement
Cotonnier (Côte d'Ivoire)	1 675 kg/ha coton graines	Tiges branches carpilles	15,3	4,1	Deat et <i>al.</i> (1976)	Feuilles et ra- cines non comptées
		Coton - graines	3,1	4,0		
		Total	18,4	8,1		
Cotonnier (Bénin)	1 244 kg/ha coton graines	Tiges branches carpilles	13,9	4,1	Deat et <i>al.</i> (1976)	Feuilles et ra- cines non comptées
		Coton - graines	1,1	2,3		
		Total	15,0	6,4		
Cotonnier (Nicaragua)	4 053 kg/ha coton graines	Plante entière âgée de 120 jours	92,5	17,4	Richard (1974)	Rendement exceptionnel- lement élevé
Cotonnier (Etats-Unis)	1 680 kg/ha coton graines	Tiges branches Fibres Graines	46,07 0,63 1,43	13,70 0,47 3,29	Cooper Paden et Garman (1947)	Feuilles et ra- cines non comptées
Hevea - <i>Hevea brasiliensis</i> Age : 33 ans (Malaisie)	1 700 kg/ha de latex coagulé par an	Plante entière (y compris racines)	3 351	922	Shorrocks (1965-b)	
		Latex par an	0,03	2,5		

Plante (Localisation)	Rendement	Organes	Ca kg/ha	Mg kg/ha	Sources	Observations
Palmier à huile - <i>Elaeis guineensis</i> Age : 20-22 ans (Nigéria)	1 060 régimes par ha (148 arbres par/ha)	Tronc	110	165	Tinker, Smilde (1963)	Ca et Mg des régimes cumu- lés sur la vie entière des arbres
		Feuilles	110	65		
		Racines	14	30		
		Régimes	76	65		
		Total	310	325		
Palmier à huile Age : 20 ans (Côte d'Ivoire)	15 000 kg/ha de régimes	Racines stipes feuilles Régimes par an	300 10	180 10	Surre et Ziller (1963)	Ca et Mg des régimes expri- més en moyenne
Tabac (Madagascar)	4 000 kg/ha de feuilles sèches)	Feuilles commerca- lisées	96,7	49,2	Velly (1967)	Exportations par les feuilles seulement
Tabac (Etats-Unis)	1 120 kg/ha de feuilles "flue-cared"	Feuilles commerca- lisées	31,8	7,38	Cooper et al. (1947)	Exportations par les feuilles seulement
Fourrages et légumineuses de couverture						
<i>Brachiaria mutica</i> (Madagascar)	40 tonnes par hectare de fourrage frais	Parties aériennes tiges + feuilles	31,14	46,80	Velly (1967)	Exportation par le fourrage
<i>Chloris gayana</i> (Madagascar)	60 tonnes par hectare de fourrage frais	Parties aériennes tiges + feuilles	67,85	46,20	Velly (1967)	Exportation par le fourrage
<i>Melinis sp.</i> (Madagascar)	70 tonnes par hectare de fourrage	Parties aériennes tiges + feuilles	37,85	87,60	Velly (1967)	Exportation par le fourrage
<i>Setaria spha- celata</i> (Madagascar)	40 tonnes par hectare de fourrage frais	Parties aériennes tiges + feuilles	30,00	37,2	Velly (1967)	Exportation par le fourrage
<i>Stylosanthes gracilis</i> (Madagascar)	30 tonnes par hectare de fourrage frais	Parties aériennes tiges + feuilles	117,14	61,8	Velly (1967)	Exportation par le fourrage
Légumineuse de couverture sous hevea		Plante entière Age : 2 ans	114	35	Watson cité cité par De Geuss (1973)	Immobilisation par la légumi- neuse âgée de 2 ans

TABLEAU III.2
Teneur en calcium et magnésium de l'arachide avec et sans fumure NPK
d'après Gillier et Sylvestre (1969)

Organe du végétal	Ca				Mg			
	Total kg/ha		Teneur en kg par 100 kg de produit récolté		Total kg/ha		Teneur en kg par 100 kg de produit récolté	
	Sans engrais	Avec NPK	Sans engrais	Avec NPK	Sans engrais	Avec NPK	Sans engrais	Avec NPK
Fanes	11,57	13,75	1,055	1,030	7,99	10,33	0,729	0,774
Graines	0,55	0,95	0,061	0,074	1,82	2,58	0,203	0,201
Coques	0,36	0,54	0,093	0,096	0,30	0,32	0,078	0,057
Plante entière	12,48	15,24	0,526*	0,480*	10,11	13,23	0,426*	0,417*

* Teneur calculée à partir du poids global de la plante avec et sans fumure.

Une fumure minérale NPK (donc sans Ca et Mg), même légère comme elle est habituellement pratiquée au Sénégal, augmente les rendements de l'arachide (1 857 kg de gousses avec NPK contre 1 293 kg/ha sans engrais) et, en même temps, les prélèvements globaux de calcium (15,24 kg/ha contre 12,48 kg/ha) et de magnésium (13,23 contre 10,11 kg/ha). Un examen du tableau III.2 montre que les pourcentages de calcium et de magnésium sont remarquablement stables dans la graine de l'arachide dans les deux cas ; par contre, lorsque sa végétation se développe grâce à une fumure minérale NPK, l'arachide a tendance à réduire de près de 10 % sa consommation en calcium par quintal de matière sèche produite, cette réduction portant exclusivement sur des organes végétatifs (fanés).

On peut logiquement penser qu'un chaulage renverserait la situation étant donné la pauvreté en calcium de ces sols de Sénégal ; c'est ce qu'a montré Spencer (1960), mais sur des citrus poussant sur les sols sableux de Floride : un chaulage apportant par hectare 93 tonnes de calcaire (associé à une fumure phosphorique importante) a fait passer la teneur en calcium des feuilles âgées de 6 mois de 1,01 % à 4,90 % du poids de matière sèche ; par contre, il y a diminution du magnésium (0,48 contre 0,34 %) après amendement calcique et aussi du potassium (2,68 contre 1,46). Il y a donc eu ici, non seulement meilleure alimentation en calcium, mais substitution partielle du magnésium et du potassium par du calcium. L'auteur n'indique pas dans quelle mesure cette substitution est bénéfique ou nuisible.

4.3. L'âge de la plante

La composition minérale de la plante varie beaucoup suivant l'âge de la plante, comme le montre un exemple venant de l'Inde concernant des cultures de maïs et de haricot (tableau III.3).

TABLEAU III.3
 Calcium et magnésium immobilisés
 dans les parties aériennes du maïs et du haricot en fonction de l'âge,
 en milliéquivalents pour 100 g de matières sèches,
 d'après Mane, Savant et Shingte (1970)

Maïs			Haricots Waghya dit "French Bean"		
Age (Jours)	Ca m.é.	Mg m.é.	Age (Jours)	Ca m.é.	Mg m.é.
3	30,8	50,9	15	130,4	44,0
15	46,8	33,4	23	148,5	51,5
30	50,5	27,5	31	119,5	57,5
			(floraison)		
45	44,7	24,9	60	147,5	59,5
75	45,2	23,3	75	114,9	58,5
105	41,0	19,6	90	92,6	62,1
			(maturité)		

Ces variations sont encore plus importantes dans le cas de cultures arborées pérennes comme l'hévéa (tableau III.4) cultivé en Malaisie.

TABLEAU III.4
 Immobilisation du calcium, du magnésium et du potassium par les hévéas
 en fonction de l'âge de la plantation, d'après Shorrocks (1965 b)

Age Année	Nombre arbres à l'hectare	CaO kg/ha	MgO kg/ha	K ₂ O kg/ha
1	445	6,3	3,5	8,43
2	445	48,8	23,1	16,9
3	445	138,3	33,8	24,4
4	408	236,2	104,6	75,7
5	371	245,0	135,3	99,8
6	346	518,4	198,0	143,1
8	321	580,6	141,6	102,4
10	296	1 059,1	402,6	291,1
24	247	1 246,1	323,3	233,8
33	267	2 966,4	694,6	502,3

Les plantes ont donc des besoins essentiellement variables en fonction de leur âge. Le tableau III.5 permet de constater que les prélèvements annuels du palmier à huile à partir du sol, très faibles jusqu'à deux ans et demi, se stabilisent ensuite à un niveau élevé jusqu'à 7 ans, période pendant laquelle l'arbre forme feuilles, régimes et tronc et fructifie, et qu'ils diminuent à la maturité (entre 7 à 10 ans) lorsqu'ils servent uniquement à la production des régimes et à l'élongation du tronc.

TABLEAU III.5

Prélèvements annuels de calcium, magnésium et potassium par le palmier à huile à divers stades végétatifs, en kg/ha/an d'éléments d'après Guitton (1974)

Age (Année)	Stades végétatifs		Ca	Mg	K	
0-2 1/2	} Formation racines feuilles	} Formation tronc	10,0	4,8	49,9	
2 1/2-4			29,3	16,8	50,6	
4-5			22,1	13,8	49,8	
5-6			} Fructififi-	24,3	15,0	62,2
6-7				25,0	16,2	69,7
7-20				20,7	15,0	53,1

L'examen des tableaux III.4 et III.5 permet de se rendre compte que les besoins en calcium et magnésium sont relativement modestes par rapport aux exigences en potassium, et surtout qu'ils sont faibles pendant le premier stade végétatif (deux à trois ans). Or c'est à ce moment-là que le sol, très enrichi par l'incinération de la végétation forestière, se trouve fort peu couvert par les Eloeis et l'Hévée et qu'il est donc susceptible de perdre ses éléments minéraux par lixiviation et érosion. Il est donc du plus haut intérêt de conserver ou d'installer une couverture végétale dense (recru forestier, légumineuses de couverture) qui permette de réduire au maximum cette dégradation du capital de fertilité.

La même remarque vaut pour les cultures annuelles, avec cette différence qu'il ne peut être question de les mettre en présence d'une plante concurrente ; mais l'agriculteur sait qu'il doit alors s'efforcer de promouvoir une pousse rapide afin d'obtenir une bonne protection du sol.

5. — QUELQUES TROUBLES PHYSIOLOGIQUES DUS A UNE CARENCE OU UN EXCÈS DE CALCIUM OU DE MAGNÉSIUM DANS LE SOL

5.1. Carences en magnésium

Un déficit en magnésium dans l'alimentation des plantes provoque le phénomène appelé chlorose internervienne, essentiellement dû à une synthèse insuffisante de chlorophylle dans les feuilles. On l'a signalé sur de nombreuses plantes annuelles dont le maïs à Madagascar (Celton, Roche, Velly, 1973), mais les manifestations les plus spectaculaires concernent les plantes pérennes :

- Palmier à huile en Malaisie (Coulter, 1972) ; au Congo et au Cameroun (Ochs, 1968) ; en Nigéria (Tinker et Gunn, 1962) ; c'est la maladie dite des feuilles orangées ;
- Caféier robusta dans l'Empire centrafricain (Forestier, 1964) ;
- Caféier arabica au Zaïre (Culot et Van Wambecke, 1958) ;
- Hévée en Malaisie (Coulter, 1972), à Ceylan et au Nigéria (de Geuss, 1967) ;

- Cacaoyer dans l'Etat de Bahia au Brésil (Cabala-Rosand et al., 1967) ;
- Bananier en Guinée (Brun et Champion, 1953) ; cette chlorose est ici appelée maladie du Bleu ;
- Théier au Zaïre et à Ceylan (Chenery et Shoenmaekers, 1959).

Ces troubles de carence dus au magnésium peuvent provenir d'une teneur insuffisante du sol en magnésium, mais souvent aussi d'un déséquilibre cationique dans le sol, comme on le verra au chapitre IV.

5.2. Carences en calcium

Les troubles dus à la seule insuffisance de la nutrition calcique dans le sol sont relativement rares (Roche, Celton, Velly, 1973), du fait que cet élément est habituellement le mieux représenté dans le sol et que les besoins des plantes sont faibles. On a tout de même signalé des cas de carence en calcium sur canne à sucre en Guiana. (Evans, 1955). Mais ils affectent essentiellement les légumineuses beaucoup plus avides de calcium que les autres plantes cultivées : ainsi un déficit prononcé du sol en cet élément induit chez l'arachide la maladie des gousses vides. Mise en évidence aux Etats-Unis en 1945 par Colwell et Brady (cités par Gouny et Prévot, 1948), cette affection fut retrouvée en Nigéria du Nord par Watson (1964).

Malgré tout comme on le verra plus loin, ce type de conséquences d'une déficience en calcium se révèle de faible importance, comparé à celles qui sont induites pour ses répercussions sur les propriétés intrinsèques du sol.

5.3. Excès de calcium du sol

La chlorose ferrique est la maladie très généralement due à un excès de calcium sous forme de sels solubles ; on l'a signalé, notamment sur caféier arabica au Zaïre (Culot et Van Wambecke, 1972), sur riz pluvial au Sénégal (Haddad et Séguy, 1972).

Un certain nombre de plantes se révèlent sensibles à une trop grande quantité de calcium échangeable dans le sol : c'est le cas des bananiers poussant dans les riches sols andiques du Cameroun ; ils sont alors affectés par la maladie dite de la « pulpe jaune » (Melin, 1970).

5.4. Excès de magnésium

Les cas d'une absorption exagérée de magnésium sont relativement rares. Elle provoque toutefois la maladie du « de grain » chez le bananier qui se traduit par une baisse de la qualité commerciale des régimes.

6. — LE pH DU SOL ET LES RENDEMENTS DES CULTURES

Le pH synthétise un ensemble de propriétés du complexe absorbant du sol où le calcium et le magnésium jouent un grand rôle, car ils représentent

normalement à eux seuls 70 à 95 % des éléments minéraux les plus disponibles pour la plante.

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, riz, maïs, arachide, sorgho qui paraissent supporter sans trop de difficultés une gamme de pH allant de 4 à 7,5 et même 8,4 pour le riz (Grant, 1964). Il en est de même pour la canne à sucre : tolérance 4,0 - 8,9 (Fauconnier, 1962 ; Guillaume, 1962 ; Rouzaud, 1962) ; pour le palmier à huile ; tolérance 3,2 - 6,5 (Ng Siew Kee, 1968) ; pour le cocotier, tolérance de 5 à 8 (Fremond et *al.*, 1966), pour le théier tolérance de 3,9 à 6,1 - 6,2 (Smith, 1963).

On a toutefois remarqué que les rendements de ces cultures variaient sensiblement en fonction du pH du sol.

6.1. Influence du pH du sol sur les rendements des cultures

Le maïs clutivé à Madagascar dans les sols acides des hauts-plateaux voit son rendement passer de 52 à 35 quintaux à l'hectare avec des pH respectivement de 4,08 et 3,67, et ceci bien que tous les éléments minéraux (sauf Ca et Mg) soient fournis en abondance (Celton, Roche, Velly, 1973).

Le manioc donne un net supplément de récolte lorsque le pH s'élève de 5 à 6. Dabin (1956) cite pour les terres de Barre du Togo des rendements de 5 tonnes/hectare de racines à pH 5 et de 30 tonnes à l'hectare à pH 6.

Le riz irrigué, on l'a vu, supporte bien des pH de 4 à 5, mais au détriment de son équilibre physiologique et donc de sa production (Ponnamperuna et *al.*, 1956), bien qu'une forte teneur en matière organique puisse dans une certaine mesure compenser l'excès d'acidité du milieu, au Sénégal tout au moins (Bonfils et Faure, 1961). Ses meilleurs rendements au Mali ont lieu à pH 6 (Dabin, 1956). Lorsque le pH dépasse 7, en particulier s'il y a concentration de cendres végétales, le riz, pluvial cette fois, peut souffrir de chlorose ferrique, en Casamance notamment (Haddad et Séguy, 1972).

L'arachide préfère des pH de 5,9 à 6 en Casamance (Fauck, 1956 a), mais craint souvent une acidité excessive : sa culture n'est plus rentable dans la vallée du Niari (Congo) lorsque le pH baisse au-dessous de 4,4-4,5 (Franquin et Martin, G., 1962) ; ses rendements diminuent dans le centre du Sénégal pour les pH inférieurs à 5,5 et deviennent nuls à pH 5 et au-dessous (Pieri, 1974).

Le bananier qui passe pour s'accommoder parfois de pH très bas voit les récoltes augmenter de 82 %, 16,6 t/ha à 30,7 t/ha de régimes —, lorsque le pH croît de 4,5 à 6 en Guinée (Champion, Dugain et *al.*, 1958), l'optimum étant situé entre pH 6 et 7, valeur confirmée par Dabin et Leneuf (1960) en Côte d'Ivoire.

Le cotonnier ne peut tolérer de pH inférieurs à 5,2 à la fois sur les sols ferrallitiques argileux de la vallée du Niari au Congo (Franquin et Martin G., 1962) et sur les sols vertiques de Bongor au Tchad (Megie, 1960), chiffres assez voisins de celui de Kilian (1964) qui, à Madagascar, déconseille la culture du cotonnier à pH inférieur à 5,6 dans les sols alluvionnaires dits de Baibohos. On a constaté en Côte d'Ivoire que le cotonnier ne pousse plus lorsque le pH du sol est voisin de 5,0 ou inférieur à 5,0 (Bouchy, 1970), ce qui est le cas également dans les latosols du centre du Brésil. Le cotonnier se révèle toujours très sensible à la réaction du milieu, ce qui a permis à Dabin (1961) de dresser une échelle des rendements en fonction du pH, échelle valable sous irrigation pour les sols sub-arides du delta central nigérien (tableau III.6).

TABLEAU III.6

pH du sol et rendements du cotonnier en culture irriguée au Mali d'après Dabin (1961) cité par Bouyer et Dabin (1963)

pH du sol	Rendements en coton-graines
pH proche de 7	2 000 kg/ha
pH 6,5	1 500 kg/ha
pH 6	1 000 kg/ha
pH 5,5	500 kg/ha
pH 5,3	300 kg/ha
pH 5,1	100 kg/ha

Il s'agit là d'expérimentations effectuées pendant la décade 1950-1960. Il est probable qu'actuellement, en raison des progrès des techniques agricoles, la production serait plus forte; mais l'échelonnement en fonction du pH du sol doit rester valable en tout état de cause.

6.2. Causes de l'action du pH sur le rendement des cultures

Ainsi qu'on la souligné plus haut, le pH est une donnée synthétique qui intègre de nombreuses propriétés du sol en particulier la saturation en bases de complexe absorbant et la teneur en matières organiques (Ollat et Combeau, 1960). D'autre part, il influe sur l'activité de la vie microbienne, l'assimilabilité des éléments majeurs et des oligo-éléments. En outre, il existe parfois une corrélation entre pH et structure au moins dans certains sols.

Activité des bactéries du cycle de l'azote

Lors de la minéralisation de l'humus, l'activité des bactéries ammonifiantes, très faible en milieu fortement acide (pH nettement inférieur à 5) croît jusqu'à pH 6 et ensuite présente un pallier, tandis que celle des bactéries nitrifiantes continue à croître jusqu'à pH 7,5 (Dommergues et Mangenot, 1970).

Ceci explique, d'une part que le riz irrigué, qui se nourrit surtout d'azote ammoniacal, préfère les pH voisins de 6, tandis que pour la majorité des autres plantes pour lesquelles l'alimentation azotée de choix est constituée de nitrates, la fourniture la plus aisée d'azote nitrique a lieu entre les pH 6,0 et 7,5 (Dabin, 1954; Dugain, 1959; Malavolta, 1967; Meyer, 1959; etc).

En ce qui concerne les bactéries fixatrices d'azote, si le pH optimum pour *Beijerinckia* se situe vers pH 5,0 - 5,5 (Dommergues, 1960; Meiklejohn, 1962; Moureaux, 1959), *Clostridium* et *Azotobacter* préfèrent les pH voisins de la neutralité soit entre 6 et 7,5 (Dommergues, *op. cit.*; Meiklejohn, *op. cit.*). En ce domaine, il faut réserver une place spéciale aux bactéries symbiotiques du genre *Rhizobium*; ces bactéries dépérissent, puis meurent lorsque le pH devient acide, soit respectivement pour les pH inférieurs à 5,5 et 5,0 tant pour le rhizobium de l'arachide dans les sols sableux du centre Sénégal (Piéri, 1974) que pour celui du trèfle en Australie (Anderson, 1956).

Bien qu'il existe des cas où les rhizobiums vivent normalement à des pH légèrement inférieurs à 5, en Casamance (Sénégal) notamment (Blondel, 1970), on considère habituellement qu'un pH de 5,0 et au-dessous n'est pas favorable à la survie de cette bactérie dans le sol et, partant à l'infestation des racines des légumineuses cultivées. Ainsi Stephens (1967 c) indique qu'un

pH de 5,1 est l'extrême limite pour la nodulation du haricot cultivé en Ouganda.

Teneurs en bases du sol

Un pH acide indique très généralement un sol désaturé en bases, donc à faibles teneurs en calcium et en magnésium. Le rhizobium des légumineuses cultivées, en particulier, semble avoir besoin d'une certaine quantité de calcium sous forme échangeable (Bonnier, 1957, au Zaïre); le seuil en fut fixé à 1 milliéquivalent pour 100 grammes de sol pour l'arachide dans le Sud du Sénégal (Fauck, 1956) et à 3 milliéquivalents pour 100 g pour le soja aux Etats-Unis (Key et al., 1962), ceci indépendamment du pH.

Par contre un pH nettement supérieur à 7,5 est le signe de la présence, soit de carbonates libres générateurs de chlorose ferrique, soit plus souvent de sodium fixé sur complexe absorbant. Dès que le rapport $\text{Na/Ca} \times 100$ dépasse 3, on observe au Mali une nette péjoration de la structure et, partant, une difficulté d'enracinement des cultures (Dabin, 1954), sans parler des effets défavorables du sodium sur la physiologie des plantes.

Toxicités développées à bas pH

On sait depuis le début du siècle (Veitch, 1904) que l'*aluminium* a la propriété de se fixer sous forme ionique sur le complexe absorbant des sols acides. Les effets toxiques de cet aluminium, bien connus depuis les travaux américains effectués entre 1918 et 1950 (Mc Lean et al., 1958), sont responsables de l'incapacité de beaucoup de sols tropicaux à porter des plantes cultivées autres que celles, peu nombreuses, qui sont résistantes à cet ion. Cette toxicité n'est évidemment pas l'apanage des sols tropicaux (elle existe notamment dans le Sud-Ouest de la France et est largement répandue aux Etats-Unis), mais elle frappe surtout entre les tropiques où les réactions des sols sont le plus souvent acides.

Elle apparaît principalement pour des pH de 5 et inférieurs à 5 et se corrige le plus souvent par apport d'amendements calcaires (Ségalen, 1973; Kamprath, 1972; Boyer, 1976; etc.).

On a pu établir pour les sols sableux ferrugineux tropicaux du centre du Sénégal une corrélation entre les rendements en arachides Y d'une part, le pH et le rapport Al/SBE, d'autre part, la relation suivante (Pieri, 1976 a):

$$Y = 1\,382,37 + 223,31 \text{ unités pH} - 37,56 \text{ Al/SBE.}$$

Le *manganèse* est à l'origine d'un autre type de toxicité fréquent dans les sols acides bien pourvus en cet élément; elle est due à la transformation des composés manganoux tétravalents peu solubles en manganèse divalent facilement assimilable, transformation d'autant plus intense que le pH s'abaisse (Cheng et Ouelette, 1971).

Comme la teneur en manganèse divalent du sol dépend tout autant des taux de manganèse total que de la réaction du sol, il s'avère fort difficile de fixer un pH de toxicité valable partout: pH 4,5 et pH 5,2 respectivement pour l'arachide et le cotonnier dans la vallée du Niari au Congo (Franquin et Martin, G., 1962); pH 4,5 à 5 pour le cotonnier, encore, dans divers sols de Côte-d'Ivoire (Bouchy, 1970); pH 5 pour le tabac à Puerto-Roco (Abruna-Rodriguez et al., 1970); pH 5,5 pour le maïs à Madagascar (Roche, Celton et Velly, 1973); pH 6 pour le sisal en Tanzanie (Mandra, 1973); pH 4 pour le riz en Sierra Leone (Tomlinson, 1956), etc. et même pH 5,6 pour le théier sur certains sols d'Ouganda (Chenéry, 1954), ce qui paraît un comble pour une plante aussi typiquement acidophile que le théier et qui dénote la présence de teneurs anormalement élevées de manganèse dans le sol.

En général, on considère qu'un apport de calcaire relevant le pH au moins à 5,5 élimine les risques de toxicité manganique, — sauf cas particulier toujours à redouter —, et cela d'autant plus facilement que le calcium développe un antagonisme ionique à l'encontre du manganèse.

Blocage du phosphore sous forme peu assimilable

A pH 7,5 et supérieur à 7,5, le calcium a tendance à bloquer le phosphore sous forme tricalcique peu assimilable.

Par contre dans les sols acides (pH inférieur à 6), le phosphore entre en combinaison avec le fer et de ce fait devient moins facilement disponible pour les plantes; ceci se produit avec d'autant plus d'intensité que le pH est plus bas (Chang et Chu, 1961; Shelton et Coleman, 1968; Fassbender, 1969; Pratt et *al.*, 1969; Dabin, 1971, entre autres...); ce qui fait dire à Malavolta (1967) que l'alimentation phosphorique est optimale entre pH 6 et pH 7,5.

Conséquence logique: de très nombreux auteurs ont constaté le rôle bénéfique, pour l'assimilabilité du phosphore, du calcaire apporté comme amendement dans les sols acides pour en relever le pH.

Assimilabilité des oligo-éléments

Une augmentation brutale du pH provoque une forte diminution d'assimilabilité du manganèse, du cuivre, du zinc, du fer et du bore (Birch, 1960; Malavolta, 1967; Sullivan, 1972), encore que dans le cas du bore cet effet soit discuté (Hatcher et *al.*, 1967; Oliver et *al.*, 1974). Aussi, préconise-t-on dans les sols ferrallitiques acides et fortement désaturés du Brésil central d'apporter systématiquement des oligo-éléments lorsque l'on procède à un chaulage (Mikkelsen et *al.*, 1961).

Par contre, la disponibilité du molybdène est augmentée si le pH s'élève (Sullivan, *op. cit.*; Malavolta, *op. cit.*; Forster, 1970).

pH, calcium et structure du sol

La pénétration des racines dans le sol dépend largement de son état structural.

On a déjà vu que dans les terres fortement alcalines (pH supérieurs à 7,5), un rapport Ca/Na échangeable supérieur à 0,33 conduisait à des structures compactes préjudiciables à l'enracinement.

La prédominance du magnésium sur le calcium dans les vertisols, sols bruns eutrophes et en général dans tous les sols à argile 2/1 induit des structures grossières et anguleuses au lieu des structures grumeleuses et finement polyédriques qui sont de règle avec le calcium. Il semble possible pour éviter cet inconvénient d'adopter pour les sols tropicaux la valeur Ca/Mg supérieure à 1 trouvée pour les sols d'Allemagne (Muller et Fastabend, 1963).

Par contre, dans les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux (essentiellement à argiles kaoliniques), le fer et la matière organique jouent le rôle principal dans la formation et le maintien de l'état structural (1). Pourtant Combeau et Monnier (1961) ont trouvé une liaison étroite entre structure et pH (donc avec le degré de saturation du complexe absorbant), tandis que Roose (1973) a constaté en Côte-d'Ivoire que les sols ferrallitiques à réaction voisine de la neutralité, donc bien fournis en bases, calcium surtout, ont une

(1) Voir en particulier les publications de Bates (1960), Combeau et Monnier (1961), Roche et Velly (1962), Nye (1963), Godefroy (1974), Boissezon (1973).

meilleure structure que les sols fortement désaturés. Il semble logique de conclure, même dans ce cas, à un rôle du calcium sur les caractéristiques structurales, soit direct, soit indirect par son action sur la qualité de la matière organique.

Il ne s'agit là que du calcium préexistant dans le sol; mais il apparaît que le calcaire et la chaux apportés comme amendements ont un rôle neutre, et sans doute légèrement bénéfique, sur les caractéristiques structurales, en dépit des craintes de Nye (1963) qui redoutait de lui voir briser les liaisons fer-kaolinite si importantes pour la structure de beaucoup de sols tropicaux.

7. — CONCLUSION

De nombreuses études de physiologie végétale ont montré que le calcium et le magnésium avaient des rôles plastiques, sans doute essentiels comme la participation du magnésium à la formation de la chlorophylle, mais ne mettant en jeu que des quantités minimales de ces corps.

Leurs fonctions physiologiques, par contre, en requièrent une concentration relativement importante dans les sucs cellulaires, fonctions qui couvrent en particulier les mécanismes de croissance cellulaires, la formation et la mobilité des hydrates de carbone, la translocation du phosphore, la synthèse de diverses protéines, l'assimilation chlorophyllienne, l'économie de l'eau, etc.

Calcium et magnésium participent aussi aux équilibres cationiques indispensables au bon fonctionnement du métabolisme végétal.

Ces équilibres à l'intérieur du végétal sont un reflet imparfait et modifié, mais un reflet tout de même, des proportions relatives des cations de la solution du sol et partant, du complexe absorbant. D'où l'importance de ce problème qui sera traité au chapitre suivant (chap. IV).

Enfin les teneurs en calcium et dans une moindre mesure, celles de magnésium, conditionnent un certain nombre de propriétés du sol, dont le pH peut donner une estimation approchée: une nutrition azotée et phosphorique correcte, l'élimination des toxicités aluminiques et manganiques en particulier coïncident avec des pH peu acides ou neutres (entre 5,5 et 7 pour simplifier). Tout ceci implique la présence dans le sol de teneurs suffisantes en calcium surtout, mais aussi en magnésium.

CHAPITRE IV

Les équilibres entre éléments minéraux du sol ou interviennent calcium et magnésium antagonismes et synergies

1. — INTRODUCTION

Lorsque les grands agronomes de la première moitié du 19^e siècle, qui d'ailleurs étaient en même temps d'excellents chimistes, prirent conscience de l'importance pour l'alimentation des plantes de certains éléments majeurs, ils soupçonnèrent très vite que ces corps chimiques devaient se trouver en proportions convenables dans le sols pour assurer une croissance normale des cultures. Déjà dans la proposition de Liebig, plus connue sous le nom de loi du minimum, il y a, sous-jacente, l'idée de cette proportionalité, semble-t-il. Il revient apparemment à l'allemand Loew (1892) le mérite d'avoir le premier défini, à la fin du siècle dernier, la nécessité d'une balance adéquate entre le calcium et le magnésium du sol et d'avoir ainsi attiré l'attention sur la notion d'équilibre entre les divers nutriments élémentaires.

Malgré tous les travaux effectués depuis lors dans les pays tempérés, les études concernant ces équilibres dans les sols des régions tropicales n'ont véritablement pris leur essor qu'après la seconde guerre mondiale, et on peut ajouter, sans faire preuve de chauvinisme, que les agronomes français y ont très largement contribué.

On a vu précédemment (Chap. III, § 3.3) combien était nécessaire une balance cationique convenable dans les sucs cellulaires pour la bonne santé des organismes végétaux; comme leur alimentation provient du sol, il est logique de penser que toute anomalie dans la composition des cations fixés sur le complexe absorbant s'y reflètera au moins dans une certaine mesure et, inversement, que des proportions favorables sont des facteurs indispensables à une bonne productivité des cultures.

On a l'habitude de caractériser les actions réciproques des éléments cationiques ou anioniques du sol par les mots « antagonisme » si ces actions

s'opposent et « synergie » si au contraire un de ces éléments favorise l'absorption d'un autre ou de plusieurs autres. Quant à l'appellation « interaction », elle prend un sens particulier en agronomie où on la réserve aux effets réciproques des nutriments entre eux lors des essais d'engrais à plusieurs niveaux, effets parfois décelés seulement par le calcul interprétatif; on parlera alors d'interaction positive ou négative, mais l'objet de cet ouvrage n'étant pas la fertilisation, il ne sera que fort peu question ici des interactions au sens strict.

La frontière entre antagonisme et synergie d'ion à ion est, sinon floue, du moins largement sous la dépendance des conditions édaphiques; il n'est pas rare qu'une synergie se mue en antagonisme, et réciproquement, selon que l'un des éléments en cause se trouve ou non dans le sol dans la zone optimale d'utilisation par la plante (Marchal, Martin-Prével, Melin, 1972).

Selon des théories, déjà un peu anciennes, mais qui semblent encore fort valables (Robertson, 1958, cité par Martin-Prével et Dugain, 1962), les échanges d'ions entre le sol et la plante au niveau de la racine sont réglés, en plus de phénomènes passifs comme l'osmose à travers les membranes des poils absorbants, par l'action de molécules organiques accepteuses et transporteuses (qui le plus souvent ne sont pas les mêmes) douées ou non d'une activité spécifique pour un ion ou une catégorie d'ions.

Il existe une non-spécificité (relative d'ailleurs) de ces molécules pour les cations alcalins et alcalino-terreux, K, Na, Ca, Mg; on conçoit alors qu'un de ces ions, très abondant dans le sol, puisse saturer la majorité des sites « accepteurs » et n'en laisser qu'une faible partie à la disposition des autres. On a par ailleurs vu (Chap. III, § 3.3) que la plante cherche à assurer à son organisme une charge constante $K + Ca + Mg + Na$, remplaçant un ion par un autre même s'il en résulte des dommages physiologiques. Par contre, si le sol contient ces cations en proportion convenable, — et ce sera le but de ce chapitre de déterminer ces proportions chaque fois que cela sera possible —, la plante bénéficiera d'une nutrition équilibrée en faisant jouer un « antagonisme de compétition » (Martin-Prével et Dugain, 1962) entre ces divers nutriments.

La plupart du temps il existe une spécificité assez nette, évidente même, entre cations et anions qui ne sont pas fixés par les mêmes molécules « accepteuses » et « transporteuses », certaines faisant la différence entre ions monovalents et divalents. Même dans le cas cité plus haut des cations alcalins et alcalino-terreux, la différence de mobilité introduit une spécificité certaine: le potassium, très mobile, aura plus de chance de rencontrer une molécule accepteuse que le magnésium, moins actif, et surtout que le calcium, ion relativement inerte. Donc « a priori » le sol devra contenir plus de calcium échangeable que de magnésium et surtout que de potassium pour assurer un équilibre alimentaire satisfaisant du végétal.

Un ion peut inhiber la synthèse par le végétal des complexes organiques accepteurs (ou transporteurs) d'un autre ion: c'est encore un antagonisme, mais cette fois sans compétitivité. Au contraire cet ion peut stimuler la formation d'accepteurs et de transporteurs pour un autre nutriment (cation ou anion), qui alors sera absorbé avec énergie et en abondance: c'est un cas classique de synergie.

La dilution, dans les solutions des sols au complexe absorbant très désaturé, introduit une difficulté supplémentaire dans l'interprétation de ces phénomènes complexes; elle peut agir apparemment dans le sens d'un antagonisme non compétitif lorsque l'absorption accrue d'un élément augmente la croissance de la plante, sans qu'il y ait formation au même rythme d'accepteurs et de convoyeurs pour d'autres éléments. L'analyse de la plante montre qu'il y a effectivement antagonisme au niveau des concentrations dans

les tissus cellulaires, mais synergie si l'on se borne à déterminer les quantités totales des éléments absorbés.

Bien qu'incomplètes, ces considérations sur les processus antagonistes et synergétiques entre nutriments, largement inspirées de l'excellent exposé de Martin-Prével et Dugain (*op. cit.*), permettront sans doute au lecteur de se rendre compte de la complexité de ces actions réciproques entre les ions qui concourent à l'alimentation des plantes, à défaut d'en saisir le détail des mécanismes dont l'exposé ne rentre pas dans le cadre de cet ouvrage.

On sait que le calcium et le magnésium forment la part la plus importante des cations fixés sur le complexe d'échange; il est donc logique de penser qu'ils auront un grand rôle à jouer dans les équilibres entre éléments minéraux du sol. On étudiera successivement dans ce chapitre les relations entre calcium et magnésium, puis celles qui concernent chacun de ces éléments avec d'autres cations comme le potassium et enfin les antagonismes et synergies entre calcium et magnésium d'une part, phosphore, cuivre, manganèse, zinc, bore d'autre part.

2. — CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Dans tout ce chapitre, les éléments minéraux du sol seront évalués en milliéquivalents de cations échangeables pour 100 grammes de sol. Les rapports chiffrés que l'on trouvera plus loin se rapportent donc à cette unité de mesure et ne tiennent pas compte d'une éventuelle transformation, avec le temps, des réserves en formes échangeables, ni des variations saisonnières des bases fixées sur le complexe absorbant. Il s'agit donc de l'état du sol à un instant donné.

C'est pourquoi, en particulier, les équilibres qui font intervenir le potassium ne sont valables que pour les sols qui ne comportent pas de montmorillonite et surtout d'illite en proportion appréciable. Non que les sols de cette nature ne répondent pas aux mêmes critères que les sols à kaolinite ou à allophane, mais le potassium assimilable s'y trouve masqué et, bien qu'accessible aux plantes, il n'est pas toujours mesuré avec exactitude par les réactifs d'échange habituellement utilisés.

D'autre part, les nutriments ne seront évalués que sur la couche arable du sol (0 à 15 ou 20 centimètres de profondeur) dans le cas de cultures annuelles ou encore sur l'ensemble des horizons explorés par la majeure partie des racines des plantes pérennes, soit en gros une vingtaine ou une trentaine de centimètres; il est évident qu'une certaine quantité de racines vont plus profondément et peuvent, de ce fait, corriger un éventuel déséquilibre dans la partie superficielle du sol. Malgré tout, c'est cette dernière qui joue le rôle principal dans l'alimentation minérale.

Lorsqu'il sera question de pH, il s'agira toujours de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ dans la proportion 1 (sol) - 2,5 (eau) pour les auteurs francophones, parfois 1/1 pour les autres (anglophones en particulier).

3. — ANTAGONISME CALCIUM-MAGNÉSIUM RAPPORT Ca/Mg

On a constaté un antagonisme net entre calcium et magnésium du complexe absorbant du sol, la présence de l'un réglant l'absorption de l'autre par les racines et inversement.

En solution nutritive, des teneurs très basses en calcium ont pour conséquence un accroissement considérable du niveau de la nutrition magnésienne de la plante (divers auteurs cités par Singh et Sharma, 1972), avec pour corollaire une toxicité du magnésium absorbé en surplus des besoins de l'organisme. Pour Jones (1951), cet effet toxique pourrait parfois être dû à la formation, à partir du magnésium en excès relatif, d'hydroxyde $Mg(OH)_2$ lorsque celui-ci provoque une élévation marquée du pH.

Il semble par contre qu'un large excès de calcium par rapport au magnésium n'ait pas, selon ces auteurs, les mêmes inconvénients. L'ion calcium, peu mobile, pénètre plus difficilement que le magnésium dans les racines et il se meut ensuite plus malaisément dans l'organisme végétal où il s'accumule souvent sous forme de composés organiques insolubles (oxalate de calcium). De ce fait il est peu toxique.

3.1. Valeur optimale du rapport Ca/Mg

Etudiant le rapport Ca/Mg dans les sols à bananiers de Guinée (sols ferrallitiques fortement désaturés et sols alluviaux désaturés), Martin-Prével (1969) fixe vers 1,5 la valeur optimale de ce rapport.

Il est vrai que le bananier est très avide de magnésium. Aussi n'est-il pas étonnant que pour une plante grosse consommatrice de calcium, la luzerne, on ait trouvé aux Etats-Unis que le rapport Ca/Mg dans le sol était le plus favorable à 6,5 (Béar et Toth, 1948), bien que d'autres auteurs aient conclu à une large tolérance de cette légumineuse (Hunter, 1949; Halstead et al., 1958).

Il apparaît que, pour la majeure partie des cultures tropicales, des valeurs de 1,5 à 5 sont tout à fait satisfaisantes (Culot et Van Wambeke, 1958; Dabin, 1970; Jadin, 1972; etc.). C'est en particulier le cas du caféier Arabica au Kenya pour lequel Mehlich (1968) a situé l'optimum de la relation Ca/Mg entre 2 et 4.

3.2. Valeur minimale du rapport Ca/Mg

On considère souvent qu'un rapport Ca/Mg égal à 1 est la limite inférieure acceptable. D'abord définie en pays tempérés, cette limite est acceptée par Fauck, Moureaux et Thomann (1969) pour les sols ferrugineux tropicaux et ferrallitiques faiblement désaturés du sud du Sénégal, sols exploités surtout pour l'arachide; elle paraît valable pour les sols à citrus de Californie (Martin et Page, 1965). Elle devrait, par contre, être quelque peu supérieure à 1 pour les sols des cacaoyères de Côte-d'Ivoire (Jadin, 1972).

Il est toutefois douteux pour certaines plantes, comme l'ananas, acidophiles, friandes de magnésium, redoutant les sols trop chargés en calcium (Martin-Prével, 1961) que cette limite inférieure du rapport Ca/Mg, soit 1, ait alors une importance primordiale; en ce qui concerne l'hévea en Malaisie, Coulter (1972) semble considérer que des teneurs en magnésium de 0,10 -

0,15 me/100 g et en calcium de 0,05 à 0,09 me/100 g sont encore compatibles avec un rendement convenable en latex, ce qui implique des rapports Ca/Mg inférieurs à 1.

3.3. Valeur maximale du rapport Ca/Mg

Hardy (1958 et 1960) et Wessel (1967) fixent à 4 la limite supérieure du rapport Ca/Mg acceptable pour les sols à cacaoyers respectivement en Amérique Centrale et au Nigéria. Toutefois Radwansky (1957) constate que dans le « Cacao Belt » du Ghana les valeurs de ce rapport s'échelonnent de 3 à 7, la majeure partie se situant entre 4 et 7, chiffres supérieurs à ceux indiqués ci-dessus. Et pourtant les rendements restent satisfaisants au Ghana. Selon Mehlich (1958) un rapport Ca/Mg supérieur à 4 est trop élevé et induit de ce fait des déficiences magnésiennes chez le caféier arabica au Kenya.

En fait, il semble bien que dans le sol, tout comme dans les solutions nutritives, un large excès de calcium par rapport au magnésium soit sans grand inconvénient pour la majorité des plantes cultivées. Le soja supporte fort bien une gamme de rapports Ca/Mg allant de 1 à 50 aux Etats-Unis (Key, Kurtz et Tucker, 1952).

Il doit exister une limite supérieure admissible, moins éloignée que ce dernier chiffre de la limite inférieure de Ca/Mg, pour certaines plantes, comme le bananier où un excès de calcium dans le complexe absorbant du sol provoque la maladie de la pulpe jaune (Melin, 1970), mais elle reste à préciser semble-t-il.

Quant aux plantes franchement acidophiles comme l'ananas, l'hévéa, le théier, etc., leurs exigences édaphiques sont telles, pH acide, désaturation importante du complexe absorbant, qu'il n'y a pas lieu de rechercher si un grand excès de calcium par rapport au magnésium leur est préjudiciable dans les sols qui leur conviennent, cet excès n'y existant pratiquement jamais.

3.4. Le rapport calcium-magnésium et les plantes annuelles

D'expérimentations faites tant sur les sols tempérés que sur les sols tropicaux, on peut retirer l'impression que les plantes annuelles ou bisannuelles sont moins sensibles aux valeurs du rapport Ca/Mg que les plantes pérennes, les premières s'accommodant assez souvent de rapports inférieurs à 1.

Ce serait le cas de la luzerne qui, selon Hunter (1949), supporte parfaitement un échelonnement de ce rapport compris entre 0,25 et 32. Pourtant Béar et Toth (1948) trouvent que l'optimum se situe vers Ca/Mg = 6,5 pour cette légumineuse.

Peut-être faut-il retenir l'explication donnée par Sanik, Perkins et Schrenk (1952): ces auteurs constatent en effet que, si le blé et le sorgho sont apparemment indifférent à la relation Ca/Mg, leur alimentation en oligo-éléments et en phosphore y est, elle, fort sensible; elle serait optimale à Ca/Mg = 4 pour les oligo-éléments et à Ca/Mg \geq 8 pour le phosphore, avec d'ailleurs une assez large gamme de tolérance (rapports Ca/Mg allant de 1 à 10 ou 12 vraisemblablement). Si tel est le cas, on peut concevoir aisément qu'un sol bien pourvu en ces corps masque avec une certaine facilité les inconvénients dus à un rapport Ca/Mg trop faible ou trop fort; inversement ces

inconvénients apparaîtront dès que les teneurs du sol en oligo-éléments et en phosphore seront un peu « limites ».

On retrouve ici l'interdépendance de tous les facteurs qui concourent à la « fertilité » d'un sol, les uns pouvant compenser la déficience des autres, au moins dans une certaine mesure.

3.5. Le rapport calcium-magnésium et la structure du sol

On sait que dans les sols comportant une large proportion d'argiles illitiques et surtout montmorillonitiques, — vertisols, sols bruns eutrophes, sols fersiallitiques —, les caractéristiques structurales dépendent largement de la proportion des cations alcalino-terreux fixés sur le complexe absorbant. Une forte dominance du magnésium sur le calcium entraîne la formation, tout au moins en surface, d'une structure grossière à éléments massifs et anguleux, alors que dans le cas inverse les éléments structuraux sont grumeleux ou finement polyédriques à arêtes émoussées.

Un rapport $Ca/Mg = 1$ paraît être la limite inférieure pour que les répercussions sur la structure ne soient pas dommageables à l'enracinement.

Quant aux sols fersiallitiques et ferrugineux tropicaux, où les argiles kaoliniques dominent très nettement, la matière organique et le fer conditionnent en premier lieu les propriétés structurales; le rôle du calcium et en général des ions alcalino-terreux y apparaît mineur, bien que cette affirmation soit sujette à controverse (Chap. III, § 6.2).

4. — L'ANTAGONISME MAGNÉSIUM-POTASSIUM ET LE RAPPORT MAGNÉSIUM-POTASSIUM

On a remarqué qu'un apport d'engrais potassiques sur un sol faiblement pourvu en magnésium provoque une absorption exagérée de potassium qui nuit considérablement à l'équilibre physiologique de la plante. Un phénomène similaire, mais inverse, se produit dans le cas de sols riches en magnésium mais déficients en potassium: le magnésium absorbé en excès peut devenir toxique.

Cet antagonisme, bien connu en Europe occidentale et en Amérique du Nord dès les années trente, semble-t-il, fut largement étudié dans la zone intertropicale par un nombre considérable d'agronomes; sans vouloir prétendre à une quelconque exhaustivité, illusoire en ce domaine, on peut citer notamment :

Ananas	Guinée	Martin-Prével et Dugain (1962)
Banancier	Guinée	Dugain (1960), Martin-Prével (1969)
	Côte-d'Ivoire	Dabin et Leneuf (1960)
	Antilles	Guillemot et <i>al.</i> (1973)
Caféier arabica	Zaïre	Culot et Van Wambecke (1958)
	Kenya	Robinson et Chenery (1958)
	Costa Rica	Carjaval (1971)
Caféier robusta	Zaïre	Frankart et Croegaert (1959)
	Empire centrafricain	Forestier (1964)
	Côte-d'Ivoire	Loué (1975)
Canne à sucre	Guiana	Evans (1955), Jack (1961)
Citrus	Etats-Unis	Martin et Page (1965)

Cotonnier	Côte-d'Ivoire Cameroun Empire centrafricain	Dabin (1956) Fritz et Vallérie (1971) Dubernard (1975)
Cocotier	Côte-d'Ivoire	Brunin (1970), Frémond et Ouvrier (1971)
Hévéa	Malaisie	Bolles-Jones (1954)
Luzerne	Etats-Unis	Omar et El Kobia (1966)
Palmier à huile	Malaisie	Coulter et Rosenquist (1955), Turner et Bull (1967)
	Nigéria	Tinker et Gunn (1962), Tinker et Smilde (1963), Olson (1970)
	Congo	Julia (1962)
	Côte-d'Ivoire	Ochs (1968)
Tomates	Brésil (São-Paulo)	Malavolta (1967)

Si le rapport Mg/K présente une rigidité certaine dans le végétal, les racines, elles, possèdent une sélectivité au niveau des poils absorbants et pourront tolérer une variabilité dans les concentrations respectives de ces deux éléments dans le sol, tout au moins entre certaines limites et ce sont ces limites qu'il appartient de définir.

4.1. Valeurs limites du rapport magnésium-potassium du sol admissibles pour certaines cultures

On s'est vite aperçu que les carences en potassium et en magnésium des plantes n'étaient pas toujours imputables à un déficit absolu du sol en l'un ou l'autre de ces éléments, et qu'il fallait bien souvent incriminer un déséquilibre dans le sol de la balance entre ces deux cations, tout au moins de leurs fractions échangeables.

Les travaux permettant de chiffrer de façon précise les valeurs minimales et maximales acceptables de ce rapport sont malheureusement peu nombreux; ils sont en outre souvent inclus dans des textes consacrés principalement à d'autres sujets et, donc, peu accessibles.

On a reporté sur le Tableau IV.1 les résultats obtenus par quelques auteurs.

La grande variabilité des chiffres obtenus nécessite quelques précisions à titre de tentative d'explication.

Tout d'abord les teneurs respectives du sol en magnésium et potassium échangeable doivent être prises en considération: par exemple dans le cas du bananier, les sols des Antilles sont largement pourvus en magnésium (nettement plus de 1 me/100 g); la plante, très sélective vis-à-vis d'un ion magnésium peu mobile et par ailleurs abondant, s'accommodera volontiers d'un rapport Mg/K légèrement supérieur à 2 (Guillemot, Lachenaud et Dormoy, 1973), alors qu'elle exige des proportions de 3 à 4 dans les sols désaturés et pauvres en Mg de Côte-d'Ivoire (Dabin et Leneuf, 1960).

Il en est de même pour le caféier *Canephora* variété *Robusta* cultivé dans l'Empire centrafricain, mais les comparaisons avec le bananier des Antilles s'avèrent délicates, l'auteur (Forestier, 1964) ayant surtout pris en compte la somme des bases échangeables.

Il semble à titre d'hypothèse que l'on puisse, en première approximation, prendre 2 comme limite inférieure de Mg/K dans les sols convenablement pourvus en magnésium (plus de 1 milliéquivalent pour 100 g de terre); 3 pour

TABLEAU IV.1
Valeurs du rapport magnésium-potassium du sol
pour quelques plantes des pays tropicaux

Nature de la culture	Localisation	Mg/K Seuil inférieur	Mg/K Seuil supérieur	Auteur
Ananas	Guinée	1	n.d.	Py (1965)
Bananier	Guinée	3	n.d.	Dugain (1960-a) Dabin et Leneuf (1960) Guillemot et al. (1973)
	Côte d'Ivoire	4	25	
	Antilles	2,0 (avec Mg > 1me/100 g)	3,7 (avec Mg > 1 me/100 gr)	
Caféier robusta	Empire centra- fricain	2,1 (avec K < 11 % SBE)	3,8 (avec K < 2,5 % SBE)	Forestier (1964)
		3 (avec K > 11 % SBE)	n.d. (probablement élevé)	
Caféier arabica	Zaïre (Kivu)	> 2,2	n.d.	Culot et Van Wambecke (1958) Carjaval (1972)
	Costa Rica	n.d.	16,5 à 18	
Citrus	Californie	2	> 12	Martin et Page (1965)
Cocotier	Côte d'Ivoire	n.d.	< 20	Fremond et Ouvrier (1971)
Cotonnier	Côte d'Ivoire Cameroun	3	25	Dabin (1956), Fritz et Vallerie (1971)
Palmier à huile	Nigeria	3,0 à 3,5	n.d.	Tinker et Smilde (1963) Julia (1962)
	Congo	> 2	n.d.	

Les signes > et < indiquent que les seuils admissibles sont certainement supérieurs ou inférieurs aux chiffres qui les suivent mais sans qu'il soit possible de présumer si ces seuils en sont proches ou éloignés.

les sols qui contiennent de 0,30 à 1 me/100 g de Mg et 3,5 à 4 pour les sols vraiment déficients en magnésium.

4.2. Quelques valeurs optimales du rapport magnésium-potassium

L'examen du tableau IV.1 permet de se rendre compte que des valeurs du rapport Mg/K de l'ordre de 3,0-4 et même supérieures à ces chiffres paraissent tout à fait acceptables pour beaucoup de cultures.

Tinker et Smilde (1963) constatent, dès que ce rapport atteint 4 et lui est supérieur, qu'il n'y a plus aucun risque de voir apparaître la maladie orangée des feuilles (« orange frond disease »), même dans les sols très

pauvres du Nigéria méridional (0,08 à 0,06 me/100 g de K; 0,06 me/100 g de Mg avant apport d'amendements : W.A.I.F.O.R., 1960-1961).

Quant au caféier, qu'il s'agisse du *Coffea arabica* de Costa-Rica (Carjaval, 1972) ou du *Coffea canephora* variété *robusta* (Forestier, 1964 et 1968), l'optimum se trouve pour $Mg/K = 3$.

Le cas du bananier présente une exception, du moins dans les riches sols de la Martinique : l'optimum serait situé à $Mg/K = 2,5$, soit très près de la valeur minimale (Martin-Prével, 1969).

5. — ÉQUILIBRE CALCIUM-POTASSIUM : ANTAGONISME OU SYNERGIE ?

5.1. Quelques valeurs du rapport calcium-potassium

En culture hydroponique, il est nécessaire de maintenir strictement un équilibre correct Ca-K, sinon l'absorption de l'azote par les racines se trouve fortement perturbée (Molle, 1957). Par contre, il apparaît d'après les travaux de Gouny et Prévot (1948) que les valeurs de cet équilibre peuvent varier sensiblement, au moins dans le cas de l'arachide qui supporte sans dommage un échelonnement du rapport Ca/K allant de 0,1 à 14 ; ces auteurs concluent qu'entre ces deux limites l'antagonisme calcium-potassium n'est aucunement préjudiciable à cette plante.

Dans le sol, sauf exception, le calcium échangeable constitue normalement la part la plus importante des cations fixés sur le complexe absorbant ; aussi les agronomes se sont-ils surtout préoccupés du magnésium et du potassium, délaissant souvent le calcium. De ce fait, les équilibres entre calcium et potassium furent-ils assez peu étudiés. Toutefois Bouyer (1954) et Silvestre (1961), passant en revue les sols à arachide du Sénégal, constatent que les rapports Ca/K y varient de 5 à 25 sans inconvénient pour la fructification de cette plante ; Julia (1962) affirme qu'à Sibiti (Congo) une valeur de 5 est insuffisante pour le palmier à huile qui ne passe cependant pas pour un gros consommateur de calcium. Carjaval (1972) trouve qu'au Costa-Rica l'optimum pour *Coffea arabica* se situe pour un rapport Ca/K de 6, bien que cette plante admette à la rigueur une plage de variation allant de 2 à 17 ; au-delà de 26, des carences potassiques se manifestent avec intensité.

Si l'on se réfère aux équilibres Ca/Mg et Mg/K répertoriés précédemment, on pourrait déduire que la valeur minimale du rapport Ca/K devrait être d'environ 4 et un bon équilibre se situerait entre 6 et 12.

5.2. Antagonisme ou synergie calcium-potassium ?

On a vu précédemment (Chap. III) que calcium et potassium jouaient des rôles antagonistes dans l'organisme végétal. Cette optique se trouve confirmée par Loué (1962) qui constate que les feuilles des caféiers *robusta* de basse Côte d'Ivoire ont tendance à se gorger de calcium lorsqu'il y a carence du sol en potassium : une fumure potassique non seulement accroît le taux de K mais déprime fortement celui de Ca. Le bananier poussant sur les alluvions de l'Ivoina (côte Est de Madagascar) et sur les tourbes de basse Côte d'Ivoire présente un comportement similaire : de fortes fumures potassiques font décroître

la teneur en calcium des limbes jusqu'à un point qui pourrait affecter la physiologie de la plante (selon Moreau et Robin, 1962 et Lassoudière, 1973).

Au contraire Heathcote (1971) arrive, lui, à une conclusion inverse, synergie calcium-potassium, lors d'un essai de fumure sur arachide effectué à Samaru (Nigéria du nord) : les engrais potassiques marquent d'autant mieux qu'ils sont accompagnés d'un apport de chaux.

Troisième « son de cloche », si l'on peut dire : Tinker (com. pers.), étudiant les résultats d'un essai de fumure calcium-magnésium sur palmier à huile au West african Institute for Oil palm Research (W.A.I.F.O.R., 1960-1961), constate que cet arbre a fort bien réagi aux applications de magnésium, mais pas du tout à celles de calcium dans ces sols pourtant très pauvres (Ca 0,15 à 0,20 me/100 g ; Mg 0,06 me/100 g ; K 0,06 à 0,08 me/100 g) ; et il exprime de sérieux doutes sur l'intérêt d'étudier les équilibres cationiques incluant le calcium.

Une telle divergence d'opinions nécessite quelques commentaires. Tout d'abord Heathcote (*op. cit.*) soupçonne une carence magnésienne dans les sols de Samaru, carence qui est manifeste au W.A.I.F.O.R., les teneurs en magnésium s'y trouvant nettement inférieures au seuil absolu comme on le verra au chapitre V ; il n'est pas étonnant, dans ces conditions, qu'une fumure magnésienne « marque » vigoureusement, d'autant plus que le rapport Mg/K est fortement déséquilibré au départ.

Par contre il est certain qu'il n'y a aucun déficit en magnésium dans les sols des bananeraies de l'Ivoloina (1,2 me/100 g de Mg ; 3,1 me/100 g de Ca ; 0,10 me/100 g de K).

Il faut ajouter que les relations entre potassium et calcium ne sont pas toujours faciles à mettre en évidence : ainsi des caféiers poussant dans le sol ferrallitique fortement désaturé d'une savane du Sud de l'Empire centrafricain, sol très mal fourni en calcium et magnésium mais à peu près convenablement pourvu en potassium, ont réagi à un apport de sulfate de magnésie en augmentant bien sûr leur nutrition magnésienne, mais aussi calcique ; en effet, cet apport de magnésium, ayant rétabli un équilibre convenable Mg/K, a débloqué l'inhibition que faisait peser l'excès de potassium sur l'absorption du calcium (Forestier, 1966).

Cette polémique, peut-être un peu lassante, a le mérite d'amener quelques conclusions :

- calcium et potassium apparaissent antagonistes au même titre que le potassium et le magnésium, mais cet antagonisme se manifeste apparemment avec moins d'intensité ;

- en cas de déficit notoire de potassium, la plante absorbe du calcium et du magnésium en surplus pour tenter de rétablir dans son organisme un total constant $K + Mg + Ca$; l'inverse (absorption exagérée de potassium) se produit si le sol est insuffisamment pourvu en calcium et magnésium ;

- en définitive, c'est la somme calcium + magnésium qui semble jouer un rôle antagoniste vis-à-vis du potassium.

6. — ÉQUILIBRE GLOBAL CALCIUM-MAGNÉSIUM-POTASSIUM LE RAPPORT $Ca + Mg/K$

La considération des équilibres entre les ions calcium, magnésium, potassium pris deux à deux a amené certains auteurs à grouper ces trois éléments en un équilibre unique.

Ainsi Ahmad, Tulloch-Reid et Davis (1969) ont constaté que de fortes fumures potassiques apportées à un sol de la Trinidad, à peu près convenablement pourvu en potassium (0,15 me/100 g de K), induisent non seulement une consommation de luxe de potassium mais dépriment les teneurs en calcium et magnésium des feuilles de *Digitaria*. Loué (1962) arrive à la même conclusion pour le caféier *Canephora*, variété *robusta*, cultivé sur les sols ferrallitiques très désaturés de Côte d'Ivoire.

Plus intéressants sont les travaux qui permettent de chiffrer cet équilibre global (tableau IV.2). Mais, parfois, on fait mention en même temps de la teneur du sol en argile et limon, celle-ci conditionnant la vitesse de libération dans la solution du sol des éléments fixés sur le complexe absorbant (Forestier, 1964).

TABLEAU IV.2
Valeurs du rapport calcium + magnésium/potassium du sol
pour quelques plantes tropicales

Nature de la culture et sol	Localisation	Ca + Mg	Ca + Mg	Auteur
		K Seuil minimum	K Seuil maximum	
Caféier <i>robusta</i> Argile + Limon = 10 % Argile + Limon = 18 % Argile + Limon = 24 %	Empire Centrafricain	12 18 24	30 à 40	Forestier (1964)
Caféier <i>arabica</i>	Costa Rica Kenya	9 10	44 à 53 (23,5 seuil de réponse aux engrais K) n.d.	Carjaval (1972) Mehlich cité par Carjaval (1972)
Cacaoyer Argile + Limon = 34 %	Brésil (Etat de Bahia)	13 à 15	> 30	Olivera-Morais et Cabalariosand (1971)
Bananier	Côte d'Ivoire Antilles	n.d. 1,5*	40 à 50 n.d.	Martin-Prevel (1963) Guillemot <i>et al.</i> (1973)

(*) Il s'agit ici du rapport Ca/Mg + K et non du rapport Ca + Mg/K comme pour les autres auteurs

Le petit nombre de résultats répertoriés sur le tableau IV-2 ne permet pas de tirer une loi générale ; malgré tout, les publications de plusieurs auteurs autorisent à penser que ces chiffres sont en gros valables pour le caféier *robusta* en Côte d'Ivoire (Loué, 1962), le caféier *arabica* au Kivu (Culot et Van Wambecke, 1958), le cocotier en Côte d'Ivoire (Fremond et Ouvrier, 1971), le palmier à huile en Nigeria (W.A.I.F.O.R., 1960-1961), plusieurs plantes cultivées en Indonésie (Middleburg, 1955).

Toutefois, Tinker (com. pers.), s'appuyant sur les travaux effectués au Nigeria sur palmier à huile, pense que le rôle principal, sinon unique, du calcium dans le sol est de neutraliser l'aluminium échangeable ; en conséquence, si l'on veut introduire un équilibre global entre les trois cations majeurs, il faut également y faire figurer l'aluminium, avec une relation du type défini par Beckett (1964),

$$\frac{K}{\sqrt[2]{Ca + Mg} + p \sqrt[3]{Al}} \quad (\text{Tinker, 1964})$$

la constante p étant estimée à 2,5 pour les sols du Nigeria où sont cultivés les *Eloeis guineensis*, et les symboles K, Ca, Al n'exprimant pas des milliéquivalents mais l'« activité » de ces ions au sens indiqué par Beckett (*op. cit.*).

7. — BALANCES CATIONIQUES DANS LE SOL

Devant la complexité des actions et réactions entre cations majeurs du sol, un certain nombre d'auteurs se sont efforcés de définir les proportions de ces cations (Ca, Mg, K), sinon optimales, du moins satisfaisantes dans les sols tropicaux. Le tableau IV.3 en donne quelques exemples, avec, à titre de comparaison, ce qui est considéré comme optimum en France.

TABLEAU IV.3

Proportions respectives des cations majeurs considérées comme satisfaisantes dans quelques sols

Culture (Type de sol)	Localisation	Ca	Mg	K	Auteur
		en % de la somme Ca + Mg + K			
Caféier arabica (Sols ferrallitiques sur basalte et sol colluvial)	Zaïre (Kivu)	75	18	7	Culot et Vanwambeke (1958)
Cultures diverses (Sols ferrallitiques et hydromorphes)	Côte d'Ivoire	65	32	3	Dabin (1970)
Cacaoyer (Sols ferrallitiques)	Côte d'Ivoire	64	31	5	Jadin (1972)
Cultures diverses (Sols ferrallitiques)	Congo Gabon	63	29	8	Martin D. Com. pers.
Toutes cultures (Sols tempérés)	France	75-80	10-15	3-6	Duchaufour (1965)

Il apparaît donc que, dans une balance cationique convenable, le calcium forme entre les deux tiers et les trois quarts de la somme des bases échangeables, tandis que le magnésium est inférieur à la moitié du calcium ; quant au potas-

sium, il est compris entre 3 et 8 % de la somme Ca + Mg + K (ces pourcentages sont calculés à partir des éléments échangeables exprimés en milliéquivalents pour 100 g de sol).

Un examen de ce tableau fait apparaître les valeurs suivantes pour les équilibres précédemment étudiés :

Ca/Mg entre 2 et 4	(sols de France vers 6 - 7)
Mg/K entre 2,6 et 10	(sols de France vers 2 - 4)
Ca + Mg/K entre 12 et 30	(sols de France entre 15 et 32)

On retombe donc « en gros » à l'intérieur des fourchettes précédemment définies lors de l'étude de ces rapports.

Il ne faudrait pas négliger, malgré tout, une donnée importante qui est la saturation du complexe absorbant (Bear et Toth, 1948). Dans les sols très désaturés (SBE/T inférieur à 10 %) des proportions équilibrées de Ca, Mg et K dans le sol ne signifieront pas forcément que la plante se trouve en conditions optimales : un pH trop acide, l'abondance d'aluminium échangeable peuvent handicaper fortement leur croissance ; en outre, il existe des teneurs « seuils » du sol en potassium et magnésium au-dessous desquelles l'alimentation en ces deux éléments est insuffisante dans tous les cas, comme on le verra au chapitre V.

8. — SYNERGIES DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM AVEC LE PHOSPHORE ET L'AZOTE ?

8.1. Interaction calcium-phosphore ou synergie indirecte ?

On a remarqué depuis longtemps, et des études récentes l'ont confirmé, qu'un apport de calcaire favorisait l'assimilabilité du phosphore dans les sols acides (Stephens, 1967 a ; Malavolta, 1967 ; Delhaye, 1970 a ; Le Mare, 1972 ; etc.) tandis que le degré de saturation en bases (calcium principalement) du complexe absorbant permet de prévoir le taux de disponibilité de cet anion (Birch, 1952 ; 1953 a, b, c ; Barrow, 1972). Autre confirmation : le phosphore assimilable dit labile (mesuré par l'isotope radioactif P^{32}) augmente proportionnellement à la dose de calcaire apporté dans les sols du Campo Cerrado brésilien (Malavolta, Crocoma et Andrade, 1964).

Bien qu'il y ait là toutes les caractéristiques d'une interaction Ca-P positive, on interprète généralement ce phénomène par trois séries de facteurs :

- la diminution et l'élimination de l'aluminium échangeable du sol sous l'effet des amendements calcaires (phosphore et aluminium du sol sont antagonistes de même que le calcium et l'aluminium ;

- la transformation des phosphates de fer peu assimilables en phosphates de calcium, hautement assimilables, à la suite du relèvement du pH et de l'augmentation des teneurs en calcium du sol ;

- une augmentation de l'activité bactérienne (suite également au relèvement du pH, lui-même conséquence de l'application de calcaire ou de dolomie) qui permet la libération du phosphore complexé à la matière organique.

De fait, Fox et *al.* (1964), ayant constaté dans les latosols de Hawaï, qu'un chaulage modeste (si modeste même qu'il ne relevait pas le pH) favorisait grandement la nutrition phosphorique des plantes, attribuent cet effet favorable du calcium à la neutralisation de la plus grande partie de l'aluminium échangeable. Par contre, Delhaye (1970) n'hésite pas à parler d'interaction positive calcium-phosphore lors de fumure du pyrèthre dans les hautes terres de Kivu (Zaïre).

Que conclure ? Il semble bien, malgré l'opinion exprimée par Delhaye, que les actions et réactions réciproques entre phosphore et calcium soient plutôt à classer dans les effets synergétiques indirects dus surtout au pH et à l'aluminium échangeable.

8.2. Synergie magnésium-phosphore

On a vu précédemment (chap. III, § 3-2) qu'une des fonctions physiologiques du magnésium dans la plante était de favoriser l'assimilation et le transport du phosphore. Il est donc logique de penser que le sol doit contenir une certaine quantité de magnésium pour qu'il y ait utilisation correcte du phosphore.

Effectivement qu'il s'agisse de cultures sur solution nutritive ou au champ, un apport de sulfate de magnésie (ou la présence de magnésium dans le milieu) provoque une substantielle augmentation de la nutrition phosphorique de petits pois aux Etats-Unis (Truog *et al.*, 1947).

Aussi à l'image de ce qui fut réalisé en Allemagne et en Russie (Gehring, 1932; Druzhinin, 1936), des agronomes néozélandais (Andrew, 1942; Askew 1942) ont mélangé de la serpentine broyée à des superphosphates ; et ils ont constaté que le magnésium, apporté ici sous forme de silicate, favorisait l'absorption du phosphore par la plante.

Il n'y a eu ici aucun relèvement du pH, et on peut conclure à une synergie magnésium-phosphore (peut être aidée par une synergie $\text{SiO}_3\text{-P}$ que l'on soupçonne sans être certain de sa réalité).

Bien que la littérature agronomique sur les sols tropicaux ne présente que peu d'exemples d'une telle synergie, il n'y a aucune raison de penser qu'elle ne s'y produit pas également.

8.3. Effets synergétiques du calcium et du magnésium avec l'azote du sol

Lors de l'étude de l'influence du pH sur le rendement des cultures (chap. III § 6), on a indiqué que tout apport de calcaire ou de dolomie, en neutralisant une réaction par trop acide du sol (pH inférieur à 5,5 et surtout inférieur à 5) provoquait un accroissement substantiel des récoltes en partie dû à une meilleure nutrition azotée. Il paraît difficile de conclure à une synergie du calcium et du magnésium avec l'azote étant donné que cet effet favorable revient à la stimulation de l'activité bactérienne (bactéries ammonifiantes et nitrifiantes) consécutive au relèvement du pH. Dabin (1961) a d'ailleurs basé une échelle de fertilité des sols de l'Afrique occidentale sur les teneurs en azote total et le pH, sans tenir compte des taux de calcium et de magnésium en tant que tels.

Pourtant Weir (1969) a remarqué qu'un apport de Kîésérite (SO_4Mg , H_2O) sur les citruses de la Trinidad avait pour conséquence non seulement une absorption supplémentaire, assez faible, de magnésium mais des teneurs croissantes des feuilles en azote, processus qui n'a rien à voir avec une augmentation du pH (le sulfate de magnésie étant plutôt acidifiant). Il y aurait donc ici une véritable synergie Mg-N, à moins que des phénomènes connexes viennent compliquer ce schéma peut-être trop simpliste.

9. — SYNERGIES ET ANTAGONISMES AVEC LES OLIGO-ÉLÉMENTS

9.1. Rôle du pH

Le pH du sol a une importance déterminante sur l'assimilabilité de nombreux oligo-éléments (chap. III § 6). Bien que les teneurs en magnésium et surtout en calcium interviennent dans la saturation du complexe absorbant et donc sur la réaction du sol, il est impossible de parler ici d'antagonismes et de synergies.

Toutefois il existe des cas où ces phénomènes jouent un rôle relativement indépendant du pH.

9.2. Antagonisme calcium-aluminium

Lorsqu'il fut question plus haut des effets apparents de synergie entre calcium et phosphore, on a vu que ces processus dépendaient souvent d'une stimulation de l'alimentation phosphorique par diminution puis élimination de l'aluminium échangeable par le calcium. Si l'on se reporte au paragraphe (8.1), on s'aperçoit que l'exemple donné par Fox *et al.* (1964) se révèle particulièrement significatif à cet égard puisqu'il n'y a pas eu relèvement du pH à la suite du chaulage.

L'aluminium échangeable présente en effet un antagonisme net avec le calcium qu'il empêche de traverser les membranes absorbantes des racelles et inversement (Brown et Foy, 1964 ; Delhayé, 1970 ; Kamprath, 1972). Mais il peut exister aussi très souvent des effets complémentaires dus à la suppression de l'antagonisme P - Al en présence de calcium ou par relèvement du pH s'il y a apport massif de calcaire ou de dolomie.

9.3. Antagonisme du calcium et du magnésium avec le manganèse

Un apport de calcaire et de dolomie réduit et même supprime les toxicités manganiques. On attribue généralement cette action au relèvement du pH, le manganèse divalent hautement assimilable ayant tendance alors à se transformer en manganèse tétravalent peu soluble ; car il n'existe pratiquement plus d'effet nocif du manganèse pour des pH égaux ou supérieurs à 5,5, sauf, bien sûr, dans quelques sols à teneurs anormalement élevées en cet élément.

Pourtant il semble bien que l'on ait vérifié, à Madagascar, l'existence d'un véritable antagonisme calcium-manganèse, ici sans relèvement du pH (Irat, 1973) ; à la limite, cet antagonisme induit des carences manganiques comme sur cacaoyer au Ghana, mais cette fois avec une réaction du sol neutre ou légèrement alcaline normalement bien supportée en tant que telle par cette plante (Cunningham, 1964).

Pour d'autres auteurs, l'antagonisme magnésium-manganèse serait le moyen le plus efficace de réduire la nocivité du manganèse, au moins pour les hévéas plantés dans les latosols acides de Malaisie (Bolle-Jones, 1957 ; Bolton et Shorrochs, 1961 ; Coulter, 1972).

9.4. Synergie calcium-molybdène

Il est bien connu qu'un relèvement du pH du sol par des amendements calcaires ou calco-magnésiens augmente la disponibilité du molybdène du sol pour les cultures. Mais on sait aussi qu'un apport de molybdène accroît l'absorption du calcium, en particulier par les légumineuses.

Cette réciprocité paraît être le type même d'une réaction synergique ; Forster (1970) a constaté que l'arachide « répondait » très favorablement au chaulage sur des sols de l'Ouganda bien fournis en calcium échangeable (6 me/100 g), à pH en principe favorable à l'arachide (pH 5,8), mais connus pour être déficients en molybdène ; il attribue cet effet favorable à une meilleure disponibilité du molybdène, grâce à une quantité supplémentaire de calcium, plus qu'au relèvement du pH (assez faible vu l'apport minime de calcaire) induit par ce chaulage.

Il est évidemment assez difficile de déterminer la part qui revient à chacun des facteurs, pH et calcium, lors d'applications même modérées d'amendements calcaires ou calco-magnésiens.

10. — CONCLUSION

De ce chapitre sur les réactions et interférences réciproques des éléments chimiques du sol, le lecteur retire sans doute une impression d'incertitude et d'à peu près, qu'il s'agisse des limites minimales, maximales ou optimales des rapports entre ions alcalins et alcalino-terreux (Ca, Mg, K) ou des synergies et antagonismes que le calcium et le magnésium développent avec le phosphore, l'azote, l'aluminium, le manganèse et le molybdène.

Il s'agit là de problèmes difficiles, trop souvent et malheureusement considérés comme mineurs, et de ce fait peu étudiés ou étudiés seulement par raccroc ; ceci explique les difficultés d'en donner une synthèse logique. En outre, pour des raisons de présentation et de commodité de l'exposé, on a volontairement séparé ces questions d'équilibre entre ions d'autres facteurs qui conditionnent aussi la fertilité et qui interfèrent avec les premiers, comme par exemple le niveau des nutriments dans le sol, qu'il s'agisse de teneurs absolues ou même de teneurs relatives en fonction de la capacité d'échange ou de la somme des bases échangeables ; ainsi il est bien évident que les rapports Ca/Mg ou Mg/K par exemple, n'ont qu'une signification douteuse dans les sols très désaturés de l'Amazonie, de Guyane ou du Gabon (où la somme des bases échangeables est souvent inférieure à 1 me/100 g), le moindre apport extérieur, cendres, fumure minérale, pouvant faire largement varier leurs valeurs.

D'autre part, les synergies et antagonismes ne font qu'assez rarement intervenir des éléments pris deux à deux comme la présentation de ce chapitre pourrait le laisser supposer. L'exemple de l'aluminium est particulièrement significatif à cet égard : sa présence dans le sol sous forme échangeable inhibe, à coup sûr, l'absorption par les racines du calcium, du phosphore, du cuivre et, au contraire, exalte celle du manganèse. Sa nocivité pourra être, et est effectivement combattue, par apport de phosphore ou de calcium. Mais on peut la diminuer, ainsi que celle du manganèse, par relèvement du pH quelle qu'en soit la cause, et également par accroissement des teneurs en matière organique, celle-ci ayant la propriété de complexer ces deux corps sous formes peu assimilables. Il est donc délicat, dans chaque cas particulier, de déterminer la part qui revient aux antagonismes et synergies tels qu'ils sont définis ici.

On a largement insisté, également, sur le rôle que pourrait avoir le pH (lui-même donnée synthétique où intervient la saturation en bases du complexe absorbant et donc le calcium et le magnésium au premier chef) sur les effets synergétiques et antagonistes vrais ou supposés avec le phosphore, l'azote, l'aluminium, etc...

Malgré ces restrictions, on peut retenir quelques grandes lignes directrices de ce chapitre sur les équilibres entre ions du sol.

Le rapport Ca/Mg peut varier sans inconvénient entre 1 et une limite supérieure (si elle existe) très élevée probablement de l'ordre de 10 à 40 (bien qu'à ce propos il faille réserver le cas des plantes acidophiles, théier, hévéa, ananas, etc.). Au-dessous de 1 on peut craindre des désordres dans la nutrition magnésienne et parfois des ennuis d'enracinement dus à une mauvaise structure (sols à argiles illitiques et montmorillonitiques).

Un rapport Mg/K de l'ordre de 3 ou légèrement supérieur à 3 est dans l'ensemble favorable à la plus grande partie des plantes cultivées. Les valeurs maximales et minimales paraissent varier assez largement suivant le type de culture et les teneurs du sol en ces deux éléments.

Le rapport Ca + Mg/K convient généralement s'il est compris entre 15 (valeur moyenne) et 25 à 35, limite que l'on peut parfois reculer vers 40 - 50.

Ces limites semblent être, au moins partiellement, sous la dépendance de la teneur en éléments fins (0 - 20 microns) du sol.

Le calcium et aussi le magnésium, présents dans le sol ou apportés par les amendements, favorisent la nutrition phosphorique et azotée, ainsi que l'absorption du molybdène. Ils dépriment l'assimilabilité du manganèse de l'aluminium, et, en général, des oligo-éléments. Le pH se révèle, d'ailleurs, ici un meilleur indicateur de ces actions synergétiques et antagonistes que les teneurs brutes en calcium et magnésium échangeables.

Malgré toutes les imprécisions qui s'attachent à l'étude qui vient d'être faite de ces équilibres, il semble important de conseiller au pédologue ou à l'agronome, chargé d'estimer les capacités agricoles d'un sol et d'en corriger éventuellement les déficiences de bien veiller au respect, au moins approximatif, des équilibres entre cations majeurs et de se rendre compte des implications de tout enrichissement au appauvrissement du sol en l'un de ces éléments sur l'assimilabilité des autres nutriments.

CHAPITRE V

Les teneurs en calcium et magnésium du sol compatibles avec les cultures Echelles de fertilité

1. — INTRODUCTION

Lorsque des agronomes accoutumés aux régions tempérées se trouvent confrontés pour la première fois avec les sols de la majeure partie des zones intertropicales, la pauvreté chimique et souvent la désaturation avancée du complexe absorbant des sols, principalement sous les climats les plus humides, sont toujours motif d'étonnement.

En ce qui concerne notre propos, la faiblesse des teneurs en calcium et magnésium pose nombre de problèmes dans beaucoup de régions : il suffira de mentionner l'opinion de Coulter (1972) suivant laquelle les sols de Malaisie sont pratiquement tous déficients, ou potentiellement déficients, en magnésium et celle de De Geuss (1967) qui considère que presque toutes les cultures arbustives et arborées d'Afrique occidentale et centrale manquent de cet élément.

Quant au déficit en calcium, il marque indirectement les sols en favorisant, entre autres inconvénients, les toxicités dues à l'aluminium si répandues dans le monde, en Amérique du Sud notamment (Guerrero, 1975; Olmos et Camargo, 1976; Boyer, 1976).

Il existe aussi, et fort heureusement, des sols convenablement pourvus en ces deux éléments.

Ce sera l'objectif de ce chapitre de tenter de définir les seuils admissibles de magnésium et de calcium, les teneurs optimales lorsqu'il est possible de les préciser pour certaines cultures, et enfin, de donner quelques échelles de fertilité lorsqu'on a pu les établir.

2. — SEUILS DE CARENCE ET DE DÉFICIENCE POUR LE MAGNÉSIUM

2.1. Variabilité des teneurs limites en magnésium échangeable suivant les auteurs

Il n'est jamais facile lorsqu'on rapproche entre elles des données chiffrées tirées de la littérature agronomique de les classer en catégories de telle sorte qu'elles soient compatibles entre elles.

Il semble que, pour le magnésium échangeable du sol, cette difficulté soit plus importante que pour d'autres nutriments.

Cela peut provenir d'une différence de conception sur le rôle nutritif du Magnésium : ainsi trouve-t-on, pour l'hévéa, en guise de teneur-limite admissible de magnésium échangeable du sol, des valeurs aussi éloignées l'une de l'autre que 0,10 me/100 g selon Bolton et Shorrocks (1961) et 1,24 me/100 g d'après Shorrocks (1965 c); il est évident que ces deux chiffres recouvrent des notions totalement différentes, d'ailleurs explicitées par les auteurs : 0,10 me/100 g représente la teneur minimale du sol en magnésium échangeable à un moment donné pour que les feuilles ne montrent pas de symptômes de carence (chlorose internervienne), et 1,24 me/100 g les prélèvements totaux en magnésium effectués sur une tranche de sol de 90 cm de profondeur par l'hévéa, pendant toute la durée de l'existence d'une plantation industrielle.

Une ambiguïté de ce genre est facile à lever. Il n'en est pas de même s'il y a confusion entre la couverture stricte des besoins alimentaires en magnésium des plantes et l'effet améliorant sur les caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, aluminium échangeable, etc.) que le magnésium du complexe absorbant partage avec le calcium.

C'est probablement pour cette raison que l'on a trouvé des teneur-limites admissibles de 0,08 me/100 g de Mg pour le soja aux Etats-Unis (Key, Kurtz et Tucker, 1962) et de 1 me/100 g de Mg pour diverses cultures vivrières, incluant le soja, en Ouganda (Stephens, 1969), mais il est difficile d'en être certain dans tous les cas.

Aussi, dans le paragraphe suivant, se bornera-t-on à répertorier les cas les plus nets qui caractérisent les seuils de magnésium échangeable du sol compatibles avec la nutrition minérale des cultures à un instant donné.

2.2. Définition des seuils de carence et de déficience

Il y a carence lorsque la plante montre des signes évidents de maladie (généralement une chlorose sur les feuilles dans le cas du magnésium) ou encore ne produit que des récoltes insignifiantes.

La déficience se révèle un peu plus délicate à définir : la plante paraît saine, mais réagit très favorablement à l'apport au sol d'un ou plusieurs éléments en augmentant sa croissance ainsi que le volume des produits récoltés, tout au moins jusqu'à une certaine teneur du sol; au-delà toute fumure supplémentaire est inutile. C'est cette limite que l'on appelle seuil de déficience qui est, en fait, un seuil de non-réponse aux engrais et amendements.

Lombin et Fayemi (1975) ont parfaitement défini ces deux seuils à propos d'une culture de maïs faite en pots sur vingt trois types de sols du Nigéria parmi lesquels 10 ferrallitiques (oxisols selon la Soil Taxonomy américaine) et 13 ferrugineux tropicaux au sens donné par d'Hoore dans

sa carte des sols d'Afrique (7 alfisols et 6 ultisols suivant la classification américaine). Le seuil de carence s'établit à 0,17 mé/100 g de magnésium échangeable pour le maïs, limite au-dessous de laquelle les symptômes foliaires de malnutrition magnésienne apparaissent nettement. Quant au seuil de déficience (non-réponse aux engrais magnésiens), il s'échelonne entre 0,28 et 0,35 mé/100 g de magnésium échangeable suivant les sols.

TABLEAU V.1
Seuils de carence et de déficience en magnésium échangeable pour quelques plantes.

Culture Type de sol	Localisation	Seuil de carence mé/100 g	Seuil de déficience mé/100 g	Source
Maïs				
Ferrallitiques fortement désaturés	Madagascar	0,10	0,25-0,30	Celton, Roche Velly (1973)
Ferrallitiques moyennement désaturés	Empire Centrafricain	0,14	n.d.	Pichot, Truong Burdin (1973)
Ferrallitiques et ferrugineux tropicaux	Nigeria	0,17	0,28-0,35	Lombin et Fayemi (1975)
Arachide				
Ferrugineux tropical sableux	Sénégal	0,10	n.d.	Pieri (1976-b)
Soja				
Séries Oguaka et Cisne	Etats-Unis	0,08 à 0,33 (?)*	0,33 (?) (*)	Key, Kurtz, et Tucker (1962)
Banancier				
Sols ferrallitiques et andosols	Antilles	0,15	n.d.	Colmet-Daage et <i>al.</i> (1970)
Palmier à huile				
Ferrallitiques fortement désaturés	Nigeria Côte d'Ivoire	0,15 n.d.	n.d. < 35	Tinker et Smilde (1963) Surre et Ziller (1963)
Hévéa				
Latosol acide	Malaisie	0,10 à 0,15	n.d.	Bolton et Shorrocks (1961)
Caféier robusta				
Sols ferrallitiques fortement désaturés	Côte d'Ivoire	n.d.	0,25	Loue (1957)

(*) Le mot anglais "deficiency" signifiant tout aussi bien carence que déficience il subsiste une incertitude faute de précisions supplémentaires fournies par le texte.

Un coup d'œil sur le tableau V.1 permet de se rendre compte qu'il y a une convergence certaine des chiffres de magnésium échangeable tant pour les seuils de carence que pour les seuils de déficience, bien que l'on ait repertorié ces valeurs pour des plantes aussi différentes que l'arachide et le palmier à l'huile, ce qui n'exclut d'ailleurs pas des variations dans le détail.

Si l'on s'en tient à l'ordre de grandeur, il apparaît que les végétaux sont fort peu exigeants quant au magnésium échangeable fourni par le sol : la limite admissible de carence se situe entre 0,10 et 0,17 milliéquivalent de magnésium échangeable pour 100 g de sol tandis que la plage de réponse aux engrais magnésiens s'étend à 0,25 et 0,35 milliéquivalent suivant les cas.

Toutefois il semble certain que pour le bananier, très friand de magnésium, ces derniers taux sont un peu faibles si l'on veut s'assurer de rendements convenables. Il paraît en être de même pour le cacaoyer dans l'état de Bahia (Brésil) où Cabala-Rosand et *al.* (1967) notèrent des réponses favorables à la dolomie jusqu'à une teneur du sol de 2 mé/100 g de magnésium échangeable; très vraisemblablement dans ce dernier cas, il s'agit d'un chiffre un peu fort, de l'avis même des auteurs, si l'on s'en tient à l'action du magnésium « sensu stricto », car l'amendement calco-magnésien eut également pour effet de relever un pH acide peu compatible avec une bonne croissance du *Theobroma cacao*.

Ce dernier exemple illustre bien le fait que le magnésium du sol n'a pas simplement pour rôle d'alimenter la plante, mais qu'il a aussi pour fonction, avec le calcium, d'assurer au sol un certain nombre de caractéristiques physico-chimiques, dont le pH, qui conditionnent aussi les rendements des cultures.

2.3. Importance de la teneur en éléments fins du sol sur les valeurs des seuils de carence et de déficience en magnésium échangeable

L'examen du tableau V.1 montre que même pour une seule plante, le maïs, il existe une variabilité importante dans les données chiffrées des seuils de carence (surtout) et de déficience, variabilité qu'il semble difficile d'imputer à des besoins différents des divers clones cultivés.

Forestier (1964), s'inspirant de travaux allemands, fit remarquer que la limite de réponse aux engrais magnésiens du caféier canephora, variété Robusta, poussant dans les sols ferrallitiques de l'Empire Centrafricain varie sensiblement en fonction de la teneur en éléments fins (0-20 microns) de l'horizon supérieur de ces sols (Tableau V.2).

TABLEAU V.2

Seuils de déficience en magnésium échangeable pour le caféier Robusta et teneurs en éléments fins de l'horizon superficiel, d'après Forestier (1964).

Argile + Limon (0-20 microns)	Seuil de déficience en Mg échangeable
Vers 17 %	0,20 mé/100 g
entre 20 et 30 %	0,25 mé/100 g
supérieur à 30 %	0,30 mé/100 g

Sans vouloir appliquer brutalement ces chiffres à d'autres plantes cultivées, il importera donc que l'agronome soit plus exigeant, s'il a affaire à des sols argileux, que pour des sols sablo-argileux ou sableux.

3. — TENEURS-LIMITES ET TENEURS OPTIMALES EN CALCIUM

3.1. Faiblesse des besoins élémentaires en calcium

On a vu précédemment que les végétaux se contentent de fort peu de calcium (chap. III, § 1).

Ayant fait pousser au Zaïre de jeunes palmiers à huile sur sable parcouru par une solution nutritive dépourvue de Ca, Broeshart (1956) confirme que les plantules se développent normalement mais que, lors de la récolte à l'âge de 31 mois, on ne trouva pas les accumulations de calcium habituelles chez leurs homologues de pleine terre. Plante acidophile également, l'hévéa paraît se contenter en Malaisie de teneurs extrêmement basses en calcium échangeable : 0,04 à 0,05 me/100 g (Coulter, 1972).

Plus sensible, le blé, cultivé en pots sur des sols tourbeux acides (pH inférieur à 4,6) de Madagascar, a présenté des carences caractérisées en calcium, alors qu'au champ celles-ci n'affectent pratiquement jamais, blé, riz et maïs qui pourtant répondent fortement aux fumures magnésiennes dans les sols ferrallitiques et hydromorphes désaturés où ils furent semés (Celton, Roche et Velly, 1973). Bien que rares, les troubles dus à un déficit du calcium du sol n'en existent pas moins : on a décelé par analyse foliaire de la canne à sucre poussant sur certains sols de Guiana de bas niveaux calciques préjudiciables à sa productivité (Evans, 1955) : le bananier planté dans les tourbières de l'Agnéby présente parfois les symptômes foliaires caractéristiques des carences en calcium chez cette plante : réduction de la dimension des limbes, « boutonnières » sur les feuilles (Lassoudière, 1973), etc.

Bien que l'on ait cité, parfois, les chiffres de calcium échangeable du sol à propos des exemples ci-dessus, il apparaît impossible de fixer même approximativement des seuils de carence et de déficience pour le calcium du sol.

Toutefois les considérations développées au chapitre précédent à propos de l'équilibre calcium-magnésium laissent supposer que le sol doit contenir une quantité de calcium au moins égale et de préférence supérieure à celle du magnésium, donc théoriquement $\text{Ca} \geq 0,35 \text{ me}/100 \text{ g}$ (excepté sans doute pour les plantes acidophiles : ananas, hévéa, théier, palmier à huile, etc.), uniquement pour assurer le respect de cet équilibre.

3.2. Importance du taux de saturation du complexe absorbant

Dans un sol normalement pourvu en bases, le calcium forme entre 60 et 90 % des éléments échangeables. Il est donc logique que l'on se soit préoccupé de définir les niveaux de calcium du sol, non pas uniquement pour satisfaire les besoins élémentaires des plantes mais en fonction de l'environnement cationique et de la saturation du complexe absorbant, souhaitables dans les sols considérés.

Bien souvent une désaturation importante ($V < 20\%$) des sols ferrallitiques et podzoliques retentit sur les rendements des récoltes par déficit en calcium, bien que les besoins des cultures soient théoriquement assurés (Demolon et Aubert, 1952). Mais il ne s'agit là que d'une estimation moyenne que l'on doit corriger cas par cas : on sait que l'hévéa et le théier, par exemple, se plaisent dans les sols acides donc fortement désaturés; à l'autre extrémité de l'échelle une saturation en bases inférieure à 30 à 40 % en sols ferrallitiques (à kaolinite dominante) est un facteur possible de troubles dans la nutrition du cacaoyer (Smyth, 1966).

Etudiant la pénétration des racines de cotonnier dans deux sols acides (pH 5,0 et 4,6) de l'Alabama ainsi que leur croissance en solution nutritive, Howard et Adams (1965) concluent que le niveau critique de calcium dépend beaucoup plus du rapport cations échangeables / calcium échangeable que de sa teneur absolue «sensu stricto». Ce niveau critique pour l'ensemble de l'expérience est de :

$$\frac{\text{Total cations échangeables}}{\text{Calcium échangeable}} = 6,66 \text{ à } 8,33 \text{ (sols et solutions nutritives),}$$

fourchette qui se resserre beaucoup dans le cas des sols seuls :

$$\frac{\text{Total cations échangeables}}{\text{Calcium échangeable}} = 7,69 \text{ à } 8,33 \text{ (sols uniquement),}$$

ce qui correspond, en prenant la capacité d'échange comme terme de comparaison, à :

$$\begin{aligned} \text{Ca} &= 5\% \text{ de la CEC dans la série Norfolk;} \\ \text{Ca} &= 10\% \text{ de la CEC dans la série Dickson;} \end{aligned}$$

ces valeurs peuvent paraître étrangement faibles, mais il ne faut pas oublier qu'il s'agit ici pour le cotonnier uniquement de la faculté de développer son système racinaire et non de fournir un rendement honorable en fibres.

Quoiqu'il en soit, l'état calcique du sol régit directement un certain nombre de caractéristiques, structure physique, réactions d'échange, pH, dont l'influence directe ou indirecte est considérable pour les cultures. Le rôle du magnésium n'est certes pas négligeable, à ce point de vue, mais c'est le calcium surtout qui est responsable de ces propriétés.

3.3. Valeurs optimales de la teneur du sol en calcium échangeable pour certaines plantes

Bien que la canne à sucre réponde généralement assez mal aux amendements calcaires, Fauconnier et Bessereau (1970) considèrent qu'il lui faut à peu près 1 me/100 g de calcium échangeable et que 0,75 me/100 g est un seuil au-dessous duquel il est dangereux de descendre.

Citant Roche, Kilian (1964) indique que, pour obtenir des rendements de 2 000 kg/ha de coton-graines, il est nécessaire que le cotonnier trouve environ 7 milliéquivalents de calcium échangeable pour 100 grammes de sol dans les terres alluviales de la Bemarivo à Madagascar. Dubernard (1975), qui n'a pas affaire à des terroirs aussi riches dans l'Empire centrafricain, calcule que la production de cette plante est liée aux teneurs du sol en calcium, magnésium et potassium échangeables par l'équation de régression suivante où le calcium tient une large place :

$$\text{Rendement} = 458 + 368 \text{ Ca} + 144 \text{ Mg/K.}$$

Si dans les sols de Côte-d'Ivoire l'ananas est indifférent à une teneur en calcium échangeable inférieure à 1 milliéquivalent pour 100 g, par contre, le bananier requiert au moins 3 mé/100 g (Godefroy, 1974).

Il est bien connu que le cacaoyer préfère les sols neutres bien saturés en bases : pourtant l'optimum pour le calcium échangeable, 24 mé/100 g, indiqué par Hardy (1960) laisse un peu rêveur : il est vrai qu'il s'agit là des sols jeunes d'Amérique centrale développés sur roches volcaniques; même la « limit of adequacy » de cet auteur, 8 mé/100 g de Ca échangeable, est très au-dessus des possibilités de la majorité des sols des pays d'Afrique occidentale pourtant grands producteurs de cacao.

Ces quelques exemples n'ont aucunement la prétention de faire le tour de la question, mais d'illustrer le fait que les conditions édaphiques optimales réclamées par certaines plantes n'ont aucun rapport avec leurs besoins élémentaires en calcium, toujours assez faibles (cf. Chap. III, Tableau III-1).

3.4. Cas particulier des légumineuses : arachide - soja

On a souligné précédemment (Chap. III, § 1) que les légumineuses consommaient environ quatre fois plus de calcium que les autres phanérogames.

Leurs besoins sont cependant faibles au départ et très dépendant du pH si l'on en croit une expérience de laboratoire de Lund (1970) sur soja (*Glycine max.*), mais ils croissent très rapidement dès que la plante fructifie : l'arachide en particulier possède la faculté d'absorber le calcium par ses gynophores et ses jeunes gousses non encore lignifiées. En outre, l'alimentation azotée des légumineuses dépend étroitement de l'infestation de leurs racines par des rhizobiums, eux-mêmes sensibles à une réaction acide du sol, car ils supportent très mal l'aluminium échangeable développé aux bas pH, par exemple dès $\text{pH} < 5,5$ dans les sols sableux du centre du Sénégal selon Piéri (1974).

Aussi n'est-il pas étonnant de constater que l'arachide réagit à un déficit de calcium du sol par des baisses de rendement; c'est la « maladie des gousses vides », dont la cause fut reconnue la première fois, semble-t-il en 1945 aux Etats-Unis par Colwell et Brady (cités par Gouny et Prévot, 1945) et retrouvée depuis par d'autres auteurs, dont Watson (1964) au Nigéria septentrional.

On a également tenté d'évaluer les teneurs du sol compatibles avec des rendements convenables : ainsi Fauck (1956) considère que l'arachide a besoin de 1,5 mé/100 g de calcium échangeable dans les sols sablo-argileux ferrallitiques et ferrugineux tropicaux du Sud du Sénégal (1 milliéquivalent étant le minimum admissible), chiffre somme toute voisin de celui de Lachover (1966) : 1,3 mé/100 g sur des sables d'Israël, et de Martin G. (1964), 2 mé/100 g dans des sols très argileux du Congo (1). A noter que Colwell et Brady (*op. cit.*) fixent aux Etats-Unis à 2 mé/100 g au minimum le taux de calcium échangeable pour lequel il existe toujours un pourcentage très satisfaisant de gousses pleines.

Quant au soja, Key, Kurtz et Tucker (1962) estiment que 3 milliéquivalents de calcium échangeable ne sont qu'un minimum aux Etats-Unis et que 9 milliéquivalents par 100 g de sol sont bien préférables. Il est cependant douteux que tous les sols qui portent régulièrement du soja tant en Extrême-Orient qu'en Amérique du sud, arrivent à ces performances.

Les légumineuses de couverture (*Pueraria*, *Centrosema*, etc.) ont des exigences analogues : elles poussent beaucoup mieux avec des pH de 6 à 7

(1) On retrouve ici un échelonnement des valeurs minimales de calcium échangeable en fonction des teneurs du sol en éléments fins. (Cf. plus loin paragraphe 4).

dans des sols bien pourvus en calcium qu'à pH inférieur à 5 avec 0,1 et 0,6 me/100 g de Ca échangeable (Watson, 1960, cité par Coulter, 1972). Elles paraissent cependant plus plastiques que l'arachide et le soja et, pourvu qu'elles aient à leur disposition assez de molybdène et ne soient pas intoxiquées par l'aluminium ou le manganèse, elles supportent assez bien des sols à désaturation avancée. Il est vrai qu'on ne leur demande que de développer leur système végétatif, et non pas de fournir une production déterminée de graines.

4. — ÉCHELLE DE FERTILITÉ FAISANT INTERVENIR LE CALCIUM ET LE MAGNÉSIUM

Il ne peut être question ici de répertorier toutes les échelles de fertilité utilisées de par le monde, échelles bien souvent établies sur des terroirs limités et dans un but bien précis; on se contentera simplement d'en donner quelques exemples significatifs. En outre, les conditions du milieu où travaille constamment un expérimentateur influent notablement sur ses appréciations: c'est ainsi que Hardy (1960), habitué aux très riches sols d'Amérique centrale, publia une échelle de fertilité pour le cacaoyer que ses collègues du Ghana et surtout du Nigéria et de Côte-d'Ivoire eussent certainement abaissée de quelques milliéquivalents s'ils l'avaient réalisée.

On a vu précédemment que, si l'on pouvait quantifier assez facilement les teneurs du sol en magnésium nécessaire aux cultures, cela n'était guère possible pour le calcium, car cet élément, composant essentiel des cations fixés sur le complexe absorbant, régit un ensemble de propriétés du sol extrêmement importantes. En outre, la disponibilité du calcium et du magnésium échangeables dépend dans une certaine mesure de la teneur du sol en éléments fins.

Aussi est-il logique de trouver des échelles de fertilité faisant intervenir conjointement ou séparément ces divers facteurs.

4.1. Echelles de fertilité faisant intervenir le magnésium seul

On en citera deux concernant des zones géographiques aux antipodes l'une de l'autre.

TABLEAU V.3
Echelles de fertilité pour le magnésium échangeable

Antilles		Malaisie	
Echelle de Gollardo pour divers sols des Caraïbes et spécialement de Cuba, citée par Sisov et Trescov (1971)		Echelle de Guha et Yeow (1966) pour les sols à hévéa de Malaisie citée par de Geuss (1973)	
Mg échangeable mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Mg échangeable mé/100 g	Appréciation de la fertilité
0,10	Basse	< 0,15	Basse (Low)
0,20	Moyenne	0,15 à 0,30	Moyenne (medium)
0,40	Bonne		
1,00	Très bonne	> 0,30	Bonne (high)

Il est, somme toute, réconfortant de constater une correspondance assez satisfaisante entre ces deux échelles, avec cette restriction que le terme ultime de Gollardo n'existe pas en Malaisie pour l'hévéa du fait des faibles exigences de cette plante et, probablement aussi en raison de la pauvreté chimique des sols qui lui sont réservés.

4.2. Echelles de fertilité où interviennent calcium et magnésium soit séparément soit inclus dans la somme des bases échangeables

Le tableau IV.4 réservé au bananier montre bien les différences de conception d'auteurs ayant travaillé dans des terroirs bien différents, Côte-d'Ivoire où les sols pauvrement pourvus en bases dominent, et Equateur où les cendres volcaniques apportent une fertilité chimique inhabituelle en Afrique de l'Ouest. Malgré tout, le degré de concordance est bon, compte tenu des diverses variétés mises en culture dans chacun de ces pays.

TABLEAU V.4
Deux échelles de fertilité pour le bananier

Cote d'Ivoire Sols ferrallitiques et hydromorphes d'après Dabin et Leneuf (1960)		Equateur Latosols, regosols, sols alluviaux d'après Herrera-Vasconez (1972)		
Somme des bases échangeables mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Calcium mé/100 g	Magnésium mé/100 g	Appréciation de la fertilité
< 1,5	Basse	0-3,2	0,-0,8	Basse
1,5 à 3	Médiocre			
3 à 6	Moyenne	3,3-6,4	0,9-1,6	Moyenne
6 à 12(*)	Bonne	> 6,5	> 1,7	Bonne à très bonne
> 12(*)	Excellente			

(*) Il s'agit souvent de sols ayant déjà reçu des amendements calco-magnésiens.

On pourrait faire les mêmes remarques à propos du tableau V.5, mais ici la variété cultivée est la même: *Coffea canephora*. var. Robusta.

TABLEAU V.5
Echelles de fertilité pour le caféier Robusta

Congo Sols ferrallitiques d'après Brugièr (1956)		Empire centrafricain Sols ferrallitiques d'après Busch (1958)	
Somme des bases échangeables mé/100 g	Appréciation de la fertilité	Somme des bases échangeables mé/100 g	Appréciation de la fertilité
< 0,75	Très basse	< 2	Basse
0,75-1,50	Basse		(caféiers déconseillés)
1,50-2,50	Médiocre	2 à 5	Moyenne
2,50-3,50	Moyenne	5 à 10	Bonne
3,50-6	Bonne		
> 6	Très bonne	> 10	Très bonne

TABLEAU V.6
Echelles de fertilité pour diverses plantes au Brésil

Etats de Sao-Paulo d'après Malavolta (1967)		Nord-Est du Brésil d'après Rodriguez-Silva, Jacomine et Almeida (1973)		
Ca + Mg me/100 g	Appréciation de la fertilité	Somme des bases échangeables	Autres données	Appréciation de la fertilité
< 3,0	Basse	< 0,8	$\frac{Al \times 100}{Al + SBE} > 60$	Basse
3,0 à 5,0	Moyenne	0,8-3	$\frac{Al \times 100}{Al + SEB} > 60$	Médiocre
> 5,0	Bonne	3-8	V entre 30 et 60 %	Moyenne
			$\frac{Al \times 100}{Al + SBE} < 30$	
		> 8	V > 80 %	Bonne

L'intérêt du tableau V.6 réside surtout dans le fait que certains des auteurs mentionnés (Rodriguez-Silva et *al.*, 1973), ont fait entrer dans l'évaluation de la fertilité des facteurs du type aluminium échangeable et saturation du complexe absorbant, trop souvent oubliés lorsqu'il s'agit d'apprécier les potentialités agricoles d'un sol.

4.3. Echelles de fertilité faisant intervenir la somme des bases échangeables et la teneur du sol en éléments fins (0 - 20 microns)

Plus un sol est pauvre en éléments fins (dimensions inférieures à 20 microns, soit argile et limon « granulométriques »), plus ses bases échangeables passent facilement dans la solution du sol et sont donc disponibles pour l'alimentation des plantes.

D'où l'énoncé, par Forestier (1960) pour la première fois semble-t-il, en régions tropicales, d'un rapport entre bases échangeables et éléments fins, la valeur chiffrée des premières étant mise au carré; ce rapport lui permet d'établir une échelle de fertilité pour les sols à caféier de l'Empire Centrafricain. Latham (1971) a effectué un travail similaire pour les sols à cotonnier de Côte-d'Ivoire (Tableau V.7).

Dabin (1970) a cherché à élargir cette notion de fertilité restreinte ici à 2 facteurs pour englober en outre une estimation de la nutrition azotée potentielle par la considération du pH et de la teneur en azote total, d'où le graphique à 3 entrées (fig. 1) qui permet de rassembler quatre éléments essentiels de la fertilité d'un sol (somme des bases échangeables, teneur en éléments fins, azote total, pH).

TABLEAU V.7

Echelles de fertilité utilisant le rapport (SBE)²/Argile % + Limon %

Empire centrafricain Sols à caféier Robusta - Sols ferrallitiques d'après Forestier (1960)		Cote d'Ivoire Sols à cotonnier - Sols ferrallitiques d'après Latham (1971)	
(SBE) ²	Appréciation de la fertilité	(SBE) ²	Appréciation de la fertilité
Argile % + Limon		Argile % + Limon	
0,2	Très basse	< 0,3	Basse Moyenne Bonne
0,4	Basse	0,3 à 1	
0,6 à 0,8	Médiocre	> 1	
1,1	Moyenne		
1,4 à 1,8	Moyenne à bonne		
1,9 à 3,5	Bonne		
4,1 à 8,8	Très bonne		
N.B. — Les bases échangeables sont exprimées en me/100 g et l'argile et le limon par leurs pourcentages respectifs lors de l'analyse granulométrique des sols.			

5. — UN FACTEUR SYNTHÉTIQUE D'APPRÉCIATION DE LA FERTILITÉ DES SOLS : LE pH

Le pH qui, par définition, mesure la réaction des sols ou mieux les proportions respectives des ions H et OH (ou assimilés) qui s'y trouvent, est un reflet relativement fidèle de la saturation du complexe absorbant par les bases, donc par le calcium et aussi par le magnésium. Il faut bien préciser « relativement fidèle », car il se révèle pratiquement impossible d'établir mathématiquement une relation linéaire, ou autre, entre ces facteurs (il semble bien qu'ils soient liés de façon un peu plus apparente dans les sols ferrallitiques, à kaolinite dominante, que dans les autres types de sols selon Combeau, Ségalen et Bachelier, 1970).

Malgré ce préliminaire, l'expérience agronomique de tous les jours conduit empiriquement à un certain nombre de constatations :

— le pH suit en gros la saturation du complexe absorbant; une valeur de 7 (neutralité) signifie habituellement une saturation comprise entre 60 et 80 %; pH 4,0 à 4,5 (forte acidité), un sol fortement désaturé (V généralement inférieur à 10 %), tandis qu'au contraire des pH 8,5 et plus laissent supposer la présence d'ions alcalins très actifs comme le sodium ou de sels solubles (carbonates, sulfates...);

— les toxicités manganiques et aluminiques n'existent qu'exceptionnellement pour des valeurs de pH égales ou supérieures à 5,5, ce qui, évidemment, ne veut pas dire qu'elles vont se produire automatiquement si le pH se situe en dessous de ce chiffre (bien que la probabilité d'un tel accident soit élevée dans ce cas);

— par contre, un pH donné, parfois même neutre, ne préjuge en rien du niveau absolu des bases dans le complexe absorbant;

— le pH peut varier au cours de l'année: il n'est pas rare d'observer des variations de l'ordre d'une unité entre le creux de la saison des pluies (pH minimum) et le fort de la saison sèche (pH maximum);

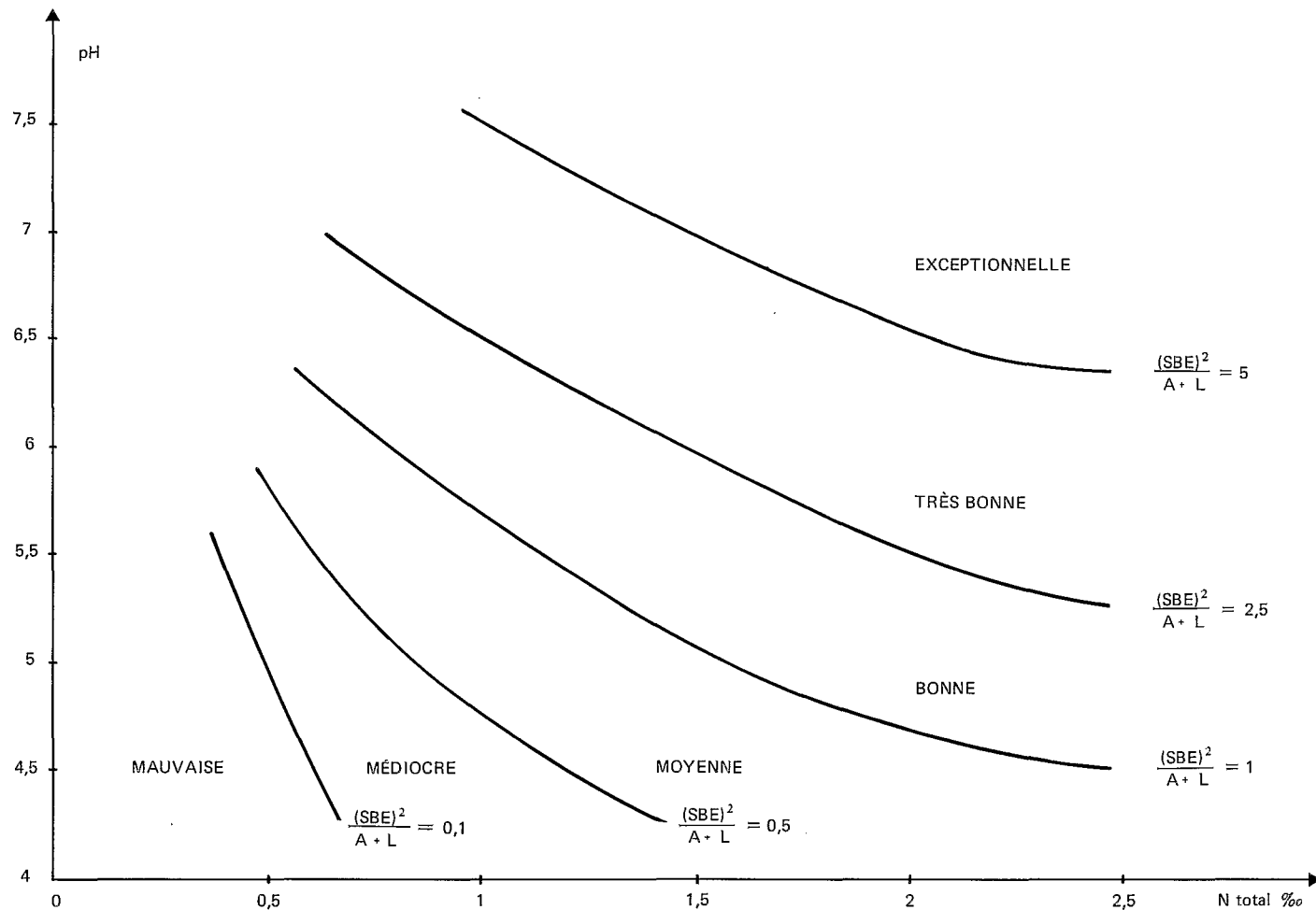


Fig. 1. — Appréciation de la fertilité des sols ferrallitiques moyennement désaturés de Côte d'Ivoire par la relation entre azote total, pH et rapport $\frac{(SBE)^2}{A+L}$, d'après Dabin (1970)

TABLEAU V.8
pH du sol et plantes cultivées

Culture	Limites de tolérance	pH optimum	Source
Ananas	4,0 - 6,5	4,5 - 5,5	Martin-Prevel et Dugain (1962)
Arachide	4,2 - 7,5	6,0 - 7,0	Fauck (1956-a) Franquin et Martin (1962)
Bananier	4,0 - 7,0	5,5 - 6 - 6,5	Champion et al. (1958)
Cacaoyer	4,0 - 8,0	6,0 - 6,5 - 7,0	Hardy (1960), Smyth (1966), Jadin (1972)
Caféier	4,5 - 7,0	5,5 - 6,0 - 6,5	Frankart et Roegaert (1959) Culot et Van Wambeke (1958)
Canne à sucre	4,0 - 8,9	6,0 - 8,0	Fauconnier (1962) Guillaume (1962)
Cocotier	5,0 - 8,0	5,8 - 7,0	Fremond, Ziller et Nuce de Lamothe (1966)
Cotonnier	5,1 - 8,0	5,6 - 7,5	Kilian (1964) Forster (1970)
Hévea	3,2 - 6,0	4,5 - 5,5	Chan et Pushaparajah (1972)
Maïs	4,0 - 8,0	6 - 7,5	
Manioc	4,0 - 7,0	5 - 6,5	
Mil pennisetum	4,0 - 8,0	5,0 - 7,5	
Palmier à huile	3,2 - 7,0	4,0 - 6,0	NG Siew Kee (1968)
Patate douce	5,25 - 7,5	6,0 - 7,0	Forster (1970)
Pyrethre	5,5 - 7,8	6,5 - 7,2	Delhaye (1970)
Riz	3,8 - 8,4	5,5 - 6 - 6,5	Tomlinson (1957-a) Bouyer et Dabin (1963) Grant (1964)
Théier	3,9 - 6,5	4,5 - 5,6 - 5,8	Chenery (1954) Bonte (1967) Willson (1969) Smith (1963)

Lorsqu'un chiffre est souligné dans la gamme des pH optimum, il indique l'optimum signalé par un auteur. Les limites de tolérance représentent les conditions extrêmes de survie de la plante sans référence aux rendements des récoltes.

— l'hydromorphie introduit un facteur d'incertitude dans l'évaluation du pH final après drainage. Ceci est particulièrement net dans le cas des sols à sulfures, où des pH de 5 à 5,5 sur sol frais se transforment en pH de 2 à 3,5 après oxydation du soufre en acide sulfurique.

Malgré toutes les restrictions que l'on peut apporter à son emploi, l'utilisation du pH se fait de manière habituelle : c'est même très souvent la

première donnée que l'agronome consulte d'un regard hâtif sur les fiches d'analyse de sol, avant de s'appesantir sur tel ou tel résultat qui l'intéresse particulièrement.

On trouvera sur le tableau V.8, une récapitulation des pH tolérés et de pH optimaux pour un certain nombre de plantes cultivées dans les régions tropicales tels qu'ils résultent des travaux effectués par de nombreux auteurs.

On ne devra consulter, et surtout utiliser, ce tableau qu'en ayant présent à l'esprit, d'une part ce qu'il y a de relatif dans la notion de pH et d'autre part le fait que les divers clones d'une même plante peuvent présenter des exigences un peu différentes : c'est ainsi qu'on a obtenu par sélection génétique des variétés de blé supportant assez bien les pH acides (de l'ordre de 4,5 - 5) et l'aluminium échangeable des sols du Rio Grande do Sul au Brésil, en tout cas nettement mieux que leurs homologues européennes ou américaines du Nord (Kamprath, 1972).

6. — CONCLUSION

Si l'on considère uniquement les besoins élémentaires des plantes, ceux-ci peuvent être couverts par des teneurs très faibles du sol en calcium et magnésium échangeables : pour le calcium elles sont très nettement inférieures à 1 me/100 g (cas extrême : 0,04 me/100 g paraît suffire à l'hévéa, selon Coulter, 1972); quant au magnésium, 0,10 à 0,17 me/100 g situe à peu près le seuil de carence et 0,25 - 0,35 me/100 g le seuil de déficience (limite supérieure de non réponse aux engrais magnésiens).

Mais ces conditions ne conviennent guère qu'aux plantes à caractère acidophile, hévéa, théier, ananas, etc.; quant aux autres elle sont beaucoup plus sensibles aux caractéristiques du sol induites par une bonne saturation en bases, calcium en particulier, fixées en quantité appréciable sur le complexe absorbant. Des exemples cités dans ce chapitre, il semble résulter qu'il faut au moins 2 à 3 milliéquivalents de bases (essentiellement Ca et, dans une moindre mesure, Mg) pour assurer des rendements agricoles corrects, ces valeurs pouvant varier en fonction de la teneur du sol en argile et limon (éléments de dimensions inférieurs à 20 microns). Dans cette optique, le pH peut fournir un premier élément d'appréciation.

Les légumineuses, du genre arachides et soja, forment une catégorie un peu à part : non seulement elles ont besoin d'un milieu faiblement acide, mais il leur faut une certaine quantité de calcium (surtout, dans le sol pour leur alimentation minérale).

Mais la fertilité d'un sol ne se limite pas à quelques facteurs. L'agronome, outre la considération des équilibres fondamentaux, devra ainsi prendre en compte les teneurs en potassium, azote, phosphore et soufre, sans oublier les propriétés physiques si importantes pour l'enracinement correct et l'alimentation en eau des cultures.

CHAPITRE VI

Lixiviation du calcium et du magnésium (1)

1. — SUSCEPTIBILITÉ A LA LIXIVIATION DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM

1.1. Susceptibilité par rapport aux autres nutriments NPK

Malgré une susceptibilité importante, le calcium et le magnésium ne sont pas les éléments chimiques du sol les plus sensibles à l'entraînement en profondeur par les eaux de drainage. Ainsi sous une forêt de Côte d'Ivoire, les pertes annuelles en potassium (314 kg/ha de K_2O) atteignent en poids d'oxydes plus du double de celles en calcium et en magnésium, (respectivement 156 et 142 kg/ha de CaO et de MgO), qui elles-mêmes se révèlent assez semblables à celles de l'azote 126 kg/ha de N , et très supérieures à celles du phosphore, corps pratiquement pas touché par la lixiviation, 4,5 kg/ha de P_2O_5 (Roose, 1970 a). Il importe toutefois de faire une réserve en ce qui concerne l'azote : l'exemple ci-dessus concerne un sol forestier, donc à l'état stable, acide (pH 5,1), où les phénomènes de minéralisation de la matière organique s'effectuent en cycle fermé; une minéralisation intense de l'humus, par exemple après un défrichage, conduirait à un entraînement proportionnellement plus important que dans le cas de la forêt, même en tenant compte des accroissements de pertes en calcium et magnésium consécutifs à cette opération.

On considère de façon globale que, dans les sols cultivés avec ou sans engrais minéraux, la susceptibilité à la lixiviation s'établit ainsi :

$$N > K > Ca > Mg > P$$

(1) Sous les tropiques humides et sub-humides, la lixiviation caractérise essentiellement la dynamique du calcium et du magnésium; ce n'est plus vrai en climat méditerranéen ou tropical aride où des accumulations de carbonates, sous forme diffuse ou sous forme de nodules, encroutement et croutes, peuvent se produire dans le profil.

1.2. Susceptibilité comparée du calcium et du magnésium des sols

Si l'on consulte la littérature agronomique, il paraît acquis que les dynamiques du calcium et du magnésium sont sensiblement parallèles dans les sols et que les sensibilités de ces éléments à la lixiviation sont assez voisines. Mais un certain nombre d'expérimentations, effectuées principalement en Afrique, amène à nuancer cette appréciation.

Dans les sols ferrugineux tropicaux et ferrallitiques sablo-argileux de Casamance (sud du Sénégal), les uns et les autres relativement bien saturés en bases avant défrichement, le rapport Ca/Mg, originellement de 2,15, tombe à 1,14 après 15 ans de culture mécanisée (Fauck, Moureaux et Thomann, 1969), ce qui implique une lixiviation du calcium proportionnellement supérieure à celle du magnésium. Quantin (1965) relate un comportement semblable dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés de l'Empire Centrafricain, plus argileux que les précédents, mais assez bien pourvus en bases.

Par contre les sols ferrallitiques argileux fortement désaturés de la vallée du Niari au Congo voient leur rapport calcium-magnésium qui est de 8,5 sous savane, passer à 22 après trois ans de culture, en raison d'une lixiviation plus importante du magnésium que du calcium (Martin G., 1970). Enfin si l'on en croit les travaux de Roose (1970 a) réalisés sur un sol de moyenne Côte d'Ivoire situé sous forêt, les pertes annuelles en calcium et magnésium exprimées en oxydes sont à peu près les mêmes, et un peu supérieures en magnésium qu'en calcium si on les exprime en milliéquivalents (respectivement $71 \times 10^{+5}$ m.e. de Mg et $55,5 \times 10^{+5}$ m.e. de Ca par hectare); toujours exprimées en milliéquivalents, elles sont identiques (0,10 m.e. pour 100 g de sol sous culture pour le calcium et le magnésium dans un sol ferrallitique fortement désaturé de Madagascar, à vrai dire déficient en magnésium (Celton, Roche, Velly, 1973).

Que penser de ces résultats contradictoires ? On a vu précédemment (chap. : II § 2) qu'en France, dès qu'un sol est fortement appauvri en calcium, c'est le magnésium qui s'évacue préférentiellement hors du complexe absorbant. Salmon (1963) confirme cette appréciation pour les sols d'Ecosse et d'Angleterre où l'intensité de la lixiviation du magnésium est inversement proportionnelle à la saturation en calcium du complexe absorbant. Des expériences de laboratoires réalisées à l'ORSTOM-Bondy sur des sols ferrallitiques du Portugal apporteraient une confirmation supplémentaire s'il en était besoin (Lamouroux, com. pers.). Qu'il s'agisse des sols tempérés acides du Sud-Ouest de la France (Clairon 1969) ou des sols ferrallitiques fortement désaturés de basse Côte d'Ivoire (Godefroy, Poignant et Marchal, 1971), on a remarqué qu'un apport de chaux réduisait sensiblement la lixiviation du magnésium, grâce à une meilleure saturation en calcium des colloïdes argilo-humiques. En outre, selon Tinker et Smilde (1963), la lixiviation provoquée par le sulfate d'ammoniaque affecte essentiellement le calcium et fort peu le magnésium dans les sols ferrallitiques carencés en magnésium des plantations d'*Eloeis guineensis* du sud du Nigéria.

Il semble donc facile de conclure que la lixiviation porte préférentiellement sur l'élément (calcium ou magnésium) « relativement » le plus abondant. Malheureusement, on arrive fort mal à cerner ce que recouvre cet adjectif; en principe, le rapport Ca/Mg devrait être un bon indicateur des susceptibilités respectives à l'entraînement par drainage, mais on ne trouve guère de corrélation nette. Sans doute faudrait-il combiner entre eux un ensemble de facteurs : rapport Ca/Mg, taux de saturation du complexe absorbant en chacun des deux cations, type de pédogenèse probablement...

1.3. Influence de la végétation sur les susceptibilités relatives du calcium et du magnésium à la lixiviation

L'action de la végétation vient encore compliquer ce schéma déjà complexe. Il semble en effet que les racines des plantes recyclent le magnésium avec beaucoup plus d'énergie que le calcium, contrariant ainsi sa lixiviation (Tinker et Smilde, 1963). De fait, Godefroy et *al.* (1972) trouvent en dix ans une stabilité certaine des teneurs en magnésium alors que les taux de calcium ont baissé de moitié dans la partie supérieure d'un sol (0-25 cm) de basse Côte d'Ivoire enrichi en ces éléments par l'incinération préalable de la forêt et maintenu ensuite sous un couvert herbacé dense (cf. 3-1, tabl. VI-5).

2. — LES FACTEURS DE LA LIXIVIATION

2.1. Le drainage

La cause principale de l'appauvrissement des sols en calcium et magnésium réside dans l'action de l'eau qui percole à travers le sol; aussi n'est-il pas étonnant de constater des lixiviations nettement plus importantes sous climat pluvieux de Côte d'Ivoire qu'au Sénégal pays sec (tableau VI-1).

TABLEAU VI-1
Intensité comparée de la lixiviation en fonction du drainage au Sénégal et en Côte d'Ivoire

Localisation	Drainage (mm)	Lixiviation		Conditions expérimentales	Sources
		CaO kg/ha	MgO kg/ha		
Sénégal	128	43	22	Cases lysimétriques	Charreau (1972)
Bambey Cultures annuelles sans engrais	118	44	20		
Côte d'Ivoire Divo Forêt secondaire	500 à 600	154	142	Sol "in situ" sur 1,50 m	Roose (1970)

Lorsque le drainage est multiplié par un facteur 5, l'entraînement du calcium quadruple et celui du magnésium est sept fois plus intense (tableau VI.1 ;) ce qui implique une assez bonne proportionnalité entre les quantités d'eau percolées et la somme du calcium et du magnésium enlevés au sol, pour autant que l'on puisse en juger d'après les deux exemples répertoriés au tableau VI.1.

Le drainage est l'agent essentiel de la lixiviation, mais un certain nombre d'autres facteurs peuvent influencer sur le volume des eaux percolées.

2.2. La couverture végétale

Une couverture végétale abondante et de belle venue évapore une importante quantité d'eau et ainsi réduit d'autant la percolation des eaux de pluies à travers le sol.

Sa suppression entraîne, en ce qui concerne le drainage, deux conséquences opposées : d'une part le volume des eaux en transit devrait augmenter du fait de la suppression de l'évapo-transpiration végétale; d'autre part, la diminution de la perméabilité superficielle du sol maintenu nu favorise le ruissellement et donc diminue le drainage. En fait, il apparaît que c'est le deuxième phénomène qui domine, comme l'a montré Roose (1973) sur les sols ferrallitiques sablo-argileux de basse Côte d'Ivoire pourtant perméables : un ruissellement superficiel très faible sous forêt, 0,9 % des pluies, passe à 31,3 % en sol nu, tandis que le drainage diminue de 43,2 % à 22 % de la pluviosité totale annuelle.

Mais la végétation n'agit pas seulement sur le bilan hydrique des sols; elle a aussi une action sur les éléments minéraux que l'on peut caractériser schématiquement ainsi :

– elle prélève dans la solution du sol une certaine quantité de nutriments, et en particulier du calcium et du magnésium, qui, sans elle, migreraient avec les eaux de drainage; elle les restitue ensuite à la partie superficielle du sol.

– elle contribue par ses apports organiques à préserver le stock d'humus toujours en perpétuelle évolution et recyclage, dont on sait qu'il contient une bonne part des cations échangeables. La destruction de 40 à 50 % de l'humus consécutive à 2 années de culture provoque en effet la disparition d'à peu près la moitié des éléments absorbés sur le complexe d'échange (Bouchy, 1973, Fauck, Moureaux et Thomann, 1969).

C'est évidemment la végétation naturelle ou de jachère qui détient l'efficacité optimum, encore qu'elle ne soit pas obsolue, et c'est le sol nu qui contribue le plus à la lixiviation des bases (tableau VI.2).

TABLEAU VI-2
Lixiviation comparée du calcium et du magnésium
sous différentes jachères et sous sol nu

Localisation	Type de jachères	Lixiviation		Sources
		CaO kg/ha/an	MgO kg/ha/an	
Sénégal Bambey (Cases lysimétriques)	Mil engrais vert	25,0	4,3	Tourte et al. (1964)
	Graminées nat. enfouies	30,8	20,2	
	Graminées nat. brûlées	29,2	10,1	
	Sol maintenu nu	77,6	38,9	
Angleterre (monolithes 30.30.87 cm)	Graminées	96	41	Low et Armitage (1970)
	Trèfle	176	59	
	sol maintenu nu	330	72	

Ainsi qu'il est montré sur le tableau VI.2, le phénomène n'est pas propre aux pays tropicaux, ici le Sénégal, puisqu'il se produit en Angleterre avec une intensité qui réflète approximativement les différences entre les quantités

d'eau qui percolent à travers le sol (environ 500 mm en Angleterre contre 150 mm à Bambey).

En se tenant à l'exemple proposé pour le Sénégal, le traitement le plus conservateur est celui du mil engrais vert qui, artificiellement établi, a poussé plus vite et plus régulièrement que les graminées spontanées plus lentes à couvrir le sol; quant au sol nu, il induit des pertes doubles à triples de celles qu'on enregistre en moyenne sous végétation.

En définitive, il apparaît que tout se résume au maintien d'une couverture végétale la plus dense et la plus fournie possible.

Quant aux cultures, leur effet sur la lixiviation est à peu près intermédiaire entre le sol nu et la végétation de jachères. En effet la préparation du sol, la mise en place des semences, leur levée et leur pousse jusqu'à couverture totale du sol exige un à trois mois, période pendant laquelle le sol est totalement puis partiellement dénudé.

Ainsi dans la vallée du Niari (Congo), avec 1200 mm de pluie, les pertes de calcium (CaO) sont de 254 kg par hectare sous arachides (2 cycles couvrant à peu près la période des pluies) et de 500 à 1 000 kg de CaO par hectare si le sol est conservé nu (Martin G., 1967); à titre de comparaison elles ne sont en moyenne que de 55 kg/ha de CaO et de 9,6 de MgO au Sénégal pour la même culture sous une pluviosité de 800 mm (Tourte et al., 1964).

Il faut faire ici une place spéciale aux espèces pérennes du type palmier à huile, caféier, cacaoyer, etc.; les plantes de couverture habituellement semées au stade jeune de ces cultures, puis l'ombrage dense développé ensuite, rétablissent au mieux un « climat » forestier qui réduit au minimum les pertes par lixiviation. Aussi Busch (1958) a-t-il constaté, dans l'Empire Centrafricain, 3 ans après le brûlis de la forêt que la somme des bases échangeables était encore de 11 à 19 milliéquivalents pour 100 g de sol au lieu de 2 à 3 me/100 g initialement, tandis que le pH, primitivement de 5,7, se situait entre 5,7 et 7,25 suivant la densité des cendres; il s'agissait là d'une jeune plantation de caféiers robusta, où une plante de couverture diminuait considérablement la lixiviation des bases que le sol ferrallitique léger en surface (13 à 20 % d'argile) et le climat relativement pluvieux (1 500 mm de pluie annuelle) auraient dû favoriser. Des expériences, menées au Zaïre sous climat analogue, ont montré que la même durée de cultures annuelles induisait déjà des carences minérales, en potassium plus qu'en magnésium et en calcium à vrai dire (Van Wambeke, 1970).

Autre exemple: le sol d'une jeune plantation d'hévéa de Côte d'Ivoire, bien couvert de recru forestier, ne perd par drainage vertical sur 1,50 m de profondeur que 44 kg par hectare et par an de calcium et 68 kg de magnésium exprimés en oxydes (Roose, 1970 b), bien que vraisemblablement il y ait eu incinération de la forêt.

2.3. Le paillis et les couvertures mortes

Le paillage du sol par les débris végétaux, généralement pris dans les parcelles voisines des champs cultivés, possède de nombreux avantages: il supprime toute érosion; il enrichit le sol en matière organique et lui cède les éléments minéraux qu'il contient; il contrôle bien les adventices s'il est assez épais; enfin il améliore le bilan hydrique, ce qui fut souvent le premier but recherché, en conservant l'humidité lors des périodes sèches.

Mais il a une conséquence nuisible souvent méconnue: parce qu'il diminue l'évaporation du sol et qu'il favorise l'infiltration des pluies, il augmente le drainage et contribue de ce fait à la lixiviation des bases. Il en est de même

pour les couvertures de plastique, employées en culture d'ananas par exemple, qui localisent dans le sillon les eaux des précipitations atmosphériques.

On ne possède pas pour le moment, tout au moins en Afrique francophone, d'éléments permettant de chiffrer cette lixiviation supplémentaire. Toutefois, Martin G. (1967) tend à attribuer en partie la pauvreté des sols de savane du sud du Congo à la coïncidence à la fin de la saison humide de fortes chutes de pluie et de la maturité des herbes de savane qui, à ce moment là, non seulement ne consomment pratiquement plus d'eau mais en outre forment un paillis protecteur contre l'évaporation. Aussi recommande-t-il d'employer pour les jachères des plantes à cycle végétatif long, comme le *Stylosanthes gracilis*, qui fructifient en saison sèche.

Dans le cas de paillis effectués avec des végétaux provenant d'autres parcelles, on apporte habituellement toujours assez d'éléments minéraux pour obtenir un bilan calcium-magnésium positif, malgré l'augmentation de la lixiviation.

2.4. Les teneurs du sol en calcium et en magnésium

Il est logique que la lixiviation du calcium et du magnésium soit plus intense dans les sols très bien pourvus en ces éléments que dans ceux qui en sont démunis : sans que l'on puisse parler de véritable proportionnalité, cette lixiviation atteint en France des tonnages de l'ordre de 600 kg/ha de CaO en sols calcaires, de 300 à 400 kg/ha en sols neutres, de 100 à 300 kg/ha en sols acides (Coppenet, 1969).

Un tel phénomène se produit également dans les sols des régions inter-tropicales.

Sur le tableau VI.3 se trouvent rassemblés trois exemples pris en Côte d'Ivoire: ils portent, le premier sur une jeune plantation d'hévéa à Anguédougou (drainage vertical 845 mm/an), le second sous forêt à Divo (drainage 500 à 600 mm/an), le troisième sous bananeraie (drainage 450 à 650 mm/an suivant les années). La lixiviation est incomparablement plus forte dans le sol de bananeraie d'Azaguié, fortement enrichi par des amendements calco-magnésiens mis à hautes doses que sous la forêt de Divo et surtout dans les pauvres sols à Hévéa d'Anguédougou.

TABLEAU VI.3
Lixiviation et teneurs de l'horizon superficiel du sol
en calcium et en magnésium en (Côte d'Ivoire)

	Prof. (cm)	Teneur du sol		Lixiviation annuelle		Source
		Ca mé/100g	Mg mé/100 g	CaO kg/ha	MgO kg/ha	
Anguédougou Hévéa	0-10	1	1	44	67	Roose (1967-b)
Divo Forêt secondaire	0-10	2,86	1,53	154	142	Roose (1967-a)
Azaguié* Bananeraie	0-25	4,2	1,0	365	149	Godefroy Roose et Muller (1975)
* Sol maintenu à un niveau élevé de fertilité par des apports constants de dolomie.						

Il faut ajouter que les bananiers d'Azaguié reçoivent en plus de dolomie, une fumure minérale NPK comprenant de l'urée ou du sulfate d'ammoniaque dont on verra plus loin qu'ils favorisent le départ du calcium et du magnésium; il faut donc voir dans les chiffres cités ici le sens d'un phénomène et non pas une proportionnalité stricte.

3. — LIXIVIATION DES APPORTS DE CALCIUM ET DE MAGNÉSIUM AU SOL

Deux cas retiendront spécialement l'attention : celui des cendres végétales déposées sur le sol après incinération de la forêt, et celui des amendements calco-magnésiens apportés par l'agriculteur.

3.1. Les cendres végétales

Evolution du calcium et du magnésium immédiatement après brûlis

Brinkman et Nascimento (1973) ont suivi le devenir des teneurs en bases échangeables dans plusieurs sols de l'Amazonie brésilienne (Manaus), enrichis par les cendres provenant de l'incinération de la forêt sempervirente. Les prélèvements effectués les 13^e, 148^e et 290^e jours après brûlis montrent, dans l'ensemble, une relative stabilité des taux de calcium et de magnésium, ainsi que du pH, alors qu'il est tombé 2833 mm d'eau pendant cette période (tableau VI.4).

TABLEAU VI.4

Teneurs en calcium et en magnésium, pH et aluminium échangeable avant et après incinération de la forêt à Manaus (Brésil), d'après Brinkmann et Nascimento (1973)

	Somme Ca + Mg échangeables mé/100 g				Av. brûl.	pH			Aluminium échangeables mé/100 g			
	Av. brûl.	Après brûlis				Av. brûl.	Après brûlis			Av. brûl.	Après brûlis	
		13 ^e	148 ^e	290 ^e			13 ^e	148 ^e	290 ^e		13 ^e	148 ^e
1 Latosol jaune argileux	0,3	1,6	0,8	2,1	3,8	4,8	3,6	4,4	1,7	0,5	1,8	0,5
2 Latosol jaune argileux	0,4	1,0	1,1	2,2	3,9	4,4	3,8	4,5	1,7	0,9	1,1	0,4
3 Latosol jaune argileux	0,3	1,1	0,6	1,2	4,1	4,5	3,6	4,2	1,2	0,7	1,1	0,7
4 Latosol jaune argileux	0,3	1,2	0,7	1,2	3,6	4,3	3,5	4,2	2,1	0,7	1,2	0,8
Sol hydromorphe	0,2	1,9	0,4	1,0	3,9	6,7	3,6	4,4	0,6	0,0	0,8	0,7

Si l'on essaie de détailler ces données, on s'aperçoit qu'il y a une forte lixiviation entre le 13^e et le 148^e jour (688 mm de pluie dans l'intervalle),

puis une remontée de la somme Ca + Mg du 148^e au 290^e jour malgré un total de précipitations qui atteint 2 140 mm entre ces deux dernières dates.

La seconde période coïncide évidemment avec le départ de recru forestier, mais cela ne peut expliquer qu'une stabilité et non une augmentation. Il faut sans doute penser à un phénomène perçu par Laudelout (1954) au Zaïre, à savoir que l'incinération n'est jamais totale et qu'il reste, non seulement les racines, mais quantité de branchettes et bois, etc. incomplètement brûlés; Laudelout estime que les éléments minéraux de ces résidus sont en quantité sensiblement équivalente à celle contenue dans les cendres. Ils se minéralisent eux aussi en bases échangeables avec le temps.

Diminution du calcium et du magnésium des cendres sous jachère herbacée.

Il paraît donc nécessaire de « tester » le sol sur plusieurs années, ce qu'ont fait Godefroy, Tisseau et Poignant (1972) dans un sol ferrallitique fortement désaturé de basse Côte d'Ivoire après combustion de l'abattis forestier et installation immédiate d'une jachère herbacée (tableau VI-5).

TABLEAU VI.5

Devenir du calcium et du magnésium échangeable sous jachère herbacée installée après incinération de la forêt (sol ferrallitique sableux fortement désaturé de basse Côte-d'Ivoire).

D'après Godefroy, Tisseau et Poignant (1972).

0 - 25 cm	Ca échangeable mé/100 g	Mg échangeable mé/100 g	Années	Ca échangeable mé/100 g	Mg échangeable mé/100 g
Témoin sous forêt	0,15-0,20	0,17-0,21	1965	0,75	0,37
Années			1966	1,04	0,87
1960	1,05	0,55	1967	1,82	0,55
1962	1,67	0,26	1968	0,81	0,50
1963	0,41	0,24	1969	0,81	0,46
1964	0,95	0,75	1970	0,66	0,41

Si l'on prend les moyennes des deux premières années et des deux dernières afin d'atténuer, autant que faire se peut, les variations dues à l'échantillonnage (les prélèvements furent tous effectués en saison sèche, période de stabilité des éléments échangeables), on s'aperçoit qu'en dix ans :

- le calcium passe de 1,36 à 0,73 me/100 g de sol, soit une perte de 50 % ;
- le magnésium reste stable : 0,40 et 0,43 me/100 g.

Il y a eu donc diminution globale du stock de calcium échangeable de 629 kg/ha de CaO entre 0 et 25 centimètres de profondeur si l'on ne tient pas compte de ce qui est immobilisé dans la végétation herbacée (probablement de l'ordre de 150 à 200 kg/ha).

Quant au magnésium, il semble bien que ce soit la remontée biologique due aux plantes qui ait évité son entraînement par les eaux de percolation, ce qui d'ailleurs avait été souligné précédemment à propos de la susceptibilité comparée du calcium et du magnésium (cf. § 1.3.).

Il n'en reste pas moins que le calcium échangeable accuse des pertes importantes même sous cet essai en principe très conservateur de la fertilité du sol (bonne couverture végétale, pas d'érosion, ruissellement négligeable, pas de dénudation périodique du sol, pas d'exportation par les récoltes, pas d'engrais).

Permanence du calcium et du magnésium des cendres en sol nu ou avec divers types de culture.

Il est intéressant de savoir dès qu'il y a culture, combien de temps va durer l'effet bénéfique de l'apport du calcium et de magnésium par les cendres végétales après incinération de la forêt. Lorsque le sol est maintenu nu ou porte une culture « ratée », ce qui revient au même, on sait qu'alors la lixiviation est intense : certains agronomes estiment que les pertes atteignent 50 % la première année, bien que l'on manque de données précises, semble-t-il, pour asseoir cette affirmation ; il est vrai que, dans ce cas, le ruissellement contribue à entraîner une quantité importante de bases. Lors de cultures sarclées, les expérimentateurs ont surtout étudié le devenir du potassium, élément le plus sensible à la lixiviation : en sol sans réserves potassiques comme le sol jaune ferrallitique fortement désaturé de Yangambi (Zaïre), l'effet bénéfique du brûlis est annulé en deux ans (Van Wambeke, 1970 a), en trois ans en Côte d'Ivoire (Bouchy, 1970). Il est vraisemblable qu'on peut probablement doubler ces délais pour voir apparaître les inconvénients dus à la disparition du calcium et du magnésium ; mais on doit aussi retenir l'avertissement de Laudelout et Van Bladel (1967) qui conseillent fermement de ne pas dépasser 2 à 3 ans de culture au Zaïre si l'on veut que le recru forestier repousse vigoureusement.

Ce sont naturellement les plantes perennes qui conservent le mieux dans le sol les cations des cendres : les expériences conduites par Bocquet et Michaux (1961), Sly et Tinker (1962) sur palmier à huile et Deuss (1967) sur caféier robusta montrent que les rendements après brûlis sont nettement plus élevés au départ que ceux sur le sol où il y a eu andainage des débris végétaux, et qu'ils décroissent ensuite, alors que dans le deuxième cas ils restent à peu près stables ; le début de cette décroissance, variable suivant les sols, se situerait en gros entre la 7^e et la 12^e année (10 ans pour Deuss, op. cit.). Cet affaiblissement des récoltes est vraisemblablement dû également, sinon davantage, à des facteurs autres que le calcium et le magnésium (potassium et pH par exemple), mais malgré tout situe un ordre de grandeur, très approximatif, pour ces deux cations (probablement 10 à 20 ans, en l'absence d'expérimentations précises). Il va sans dire qu'il s'agit dans tous ces cas de plantations conduites dès l'origine avec légumineuses de couverture, donc avec un maximum de précaution pour lutter contre la lixiviation (et l'érosion).

3.2. Les amendements calco-magnésiens

Après avoir apporté 144 équivalents-gramme de calcium et 20 équivalents-gramme de magnésium sur des rectangles de 2 m² proches de pieds de palmier à huile, Laudelout (1950) constate qu'il n'y a pratiquement pas eu d'entraînement au-delà de 60 cm du calcium et du magnésium au bout de deux ans pour un tiers de la dose (ici phosphate tricalcique) et un an pour les deux tiers de la dose (sous forme de cendres de bois) dans les sols jaunes ferrallitiques fortement désaturés de Yangambi (Zaïre).

Cependant la plupart des auteurs estiment qu'un apport de calcium et de magnésium au sol a pour conséquence une lixiviation accrue de ces deux corps. Freitas et Van Raij (1975) sont assez optimistes en évaluant les effets à long terme d'un chaulage dans le Campo-Cerrado pauliste (Brésil) : une application de dix tonnes par hectare de calcaire broyé marquait encore

assez fortement les cultures de coton, soja et arachides au bout de 6 ans, à tel point que l'on pouvait estimer l'effet résiduel à une dizaine d'années. Ce n'est pas le cas en Indonésie sur des latosols rouges où *Brassica juncea* (moutarde) et *Allium ascalonicum* ne bénéficient respectivement que pendant 3 ans et 2 ans d'un apport de quatre tonnes par hectare de calcaire; dès la fin de la 3^e année, le pH est revenu à sa valeur initiale (Satsitati, Said et Dahro, 1974).

Il serait aisé de multiplier de tels exemples mais il semble plus intéressant de citer des expériences où l'on a tenté de chiffrer les pertes par lixiviation.

Ayant appliqué 1430 kg/ha de CaO et 115 kg/ha de MgO (quatre tonnes par hectare d'un calcaire faiblement dolomitisé) dans les sols ferrallitiques fortement désaturés argileux (71 % d'argile) et acides (pH 4,85) de la vallée du Niari au Congo, Martin G. (1961) calcule à partir des teneurs en bases échangeables du sol qu'en trois ans le sol a perdu à peu près la moitié du calcium et les deux tiers du magnésium de l'amendement (tableau VI.6).

TABLEAU VI.6

Devenir au bout de 3 ans du calcium et du magnésium d'un amendement fortement calcique dans un sol argileux de la vallée du Niari (Congo), d'après Martin G. (1961).

	Apport initial	0 - 15 cm	15 - 30 cm	Total	% fixé	% Pertes
CaO kg/ha	1 430	625	80	725	50,7	49,3
MgO kg/ha	115	33	11	44	38,2	61,8

Il ne s'agit pas ici d'une terre nue mais de cultures d'arachide (sur 3 cycles) et de jachères à *Stylosanthes gracilis* non exploitées (un an et demi). Les arachides, ayant fourni 3 600 kg/ha de gousses (seules exportées); n'ont donc enlevé qu'environ 2,5 kg/ha de CaO et 5 kg/ha de MgO; quant au *Stylosanthes*, il immobilise environ 120 kg/ha de CaO et 40 kg/ha de MgO. Ce qui conduit à estimer grossièrement les pertes par la seule lixiviation à 580 kg/ha de CaO (40 % de l'apport) et à 26 kg/ha de MgO (23 % de l'apport).

Etudiant « in situ » le drainage dans une plantation de bananiers en basse Côte d'Ivoire, sur un sol ferrallitique au départ fortement désaturé mais artificiellement enrichi par de la dolomie au cours de vingt années de culture bananière (Ca 4,2 me/100 et Mg 1,0 me/100 g, pH 5,5 en surface sous-bananières contre 0,5 me/100 g de Ca, 0,2 me/100 g de Mg et pH 4,0 sous forêt), Godefroy, Roose et Muller (1975) arrivent à une conclusion désolante : alors que, de 1966 à 1973, on a apporté 3 tonnes par hectare de CaO et 1,5 tonnes/ha de MgO, l'analyse des eaux de drainage a montré que les pertes par lixiviation atteignaient la totalité de l'apport pour le calcium et 90 % pour le magnésium. Si on ajoute les exportations par les récoltes, moins de 10 kg/ha de CaO, pas tout à fait 100 kg/ha pour MgO, le bilan se trouve équilibré, mais n'en traduit pas moins une importance énorme de la lixiviation qui atteint ici en moyenne annuelle par hectare 380 kg de CaO et 175 kg/ha de MgO. Les auteurs reconnaissant d'ailleurs que le bananier est un mauvais utilisateur des fumures que l'on peut lui offrir.

Des prairies à *Panicum maximum* et *Stylosanthes gracilis* ont perdu par lixiviation dans la même région respectivement 219 kg/ha et 134 kg/ha de CaO (apport 333 et 182 kg/ha CaO) ainsi que 35,6 kg/ha et 22 kg/ha de MgO (apport 84 kg/ha et 45,6 kg/ha MgO) (Roose et Talineau, 1973), ce qui traduit

malgré tout une moindre intensité du phénomène; mais ici, compte tenu des exportations, le bilan du calcium et du magnésium est négatif.

Il est certain, et l'exemple des sols de bananeraies le prouve, que l'état de saturation du sol en calcium et magnésium influe grandement sur l'intensité des pertes par lixiviation. Martin G. (1961) avait déjà remarqué que dans les sols à pH 4,4 de la vallée du Niari (Congo) il fallait tripler la dose théorique de calcaire pour obtenir au bout d'un an pH 7,0 (afin de tenir compte de la lixiviation qui enlève en une année 65 % des 16 tonnes/ha de CaO), tandis qu'il suffisait de la multiplier par 1,5 pour avoir pH 5,0 après une année (lixiviation en un an de 31,4 % de l'apport de 1,75 t/ha de CaO).

C'est sur un sol fortement désaturé de Côte d'Ivoire (sol ferrallitique appauvri modal) de Godefroy, Poignant et Marchal (1971) ont réalisé une expérience de chaulage dans une plantation d'ananas; les résultats consignés dans le tableau VI.7 montrent qu'au bout d'un an la lixiviation du calcaire apportée par la chaux éteinte (lixiviation estimée par les teneurs du sol en bases échangeables) reste modérée probablement en raison de la modicité des apports et de l'état de désaturation du sol. Elle représente malgré tout une déperdition importante.

TABLEAU VI.7

Estimation des pertes en calcium au bout d'un an après chaulage d'un sol ferrallitique fortement désaturé de Basse Côte d'Ivoire, d'après Godefroy, Poignant et Marchal (1971).

Forme de l'amendement	CaO apporté tonne/ha	Teneur du sol en Ca échangeable mé/100 g		Lixiviation estimée	
		janvier 1968	février 1969	kg/ha	% de l'apport
	0	0,5	0,2	160	0
Chaux éteinte	1,65	3,5	2,3	630	14
"	3,30	7,3	4,4	1 520	26
"	6,60	11,2	8,1	1 630	14,7
Plâtre	1,32	1,9	1,1	420	20

Ces constatations ont amené les agronomes à ne préconiser que des apports annuels faibles, simplement pour stabiliser pH et stock calcique et magnésien du sol dès qu'ils sont compatibles aux cultures: ainsi Celton, Roche et Velly (1973) se contentent-ils de mettre 300 kg/ha/an de dolomie sur du maïs poussant dans les sols ferrallitiques acides (pH 4,7) de la Sakay (Madagascar); par contre, tout apport plus léger laisse apparaître dans ces sols et des carences magnésiennes et des toxicités aluminiques, ces dernières étant intenses pour des pH égaux ou inférieurs à 4,5.

Pour éviter ces coûteuses lixiviations, on semble s'orienter dans le Sud du Brésil vers de faibles apports biannuels d'amendements calco-magnésiens sur la rotation soja-blé (Camargo, comm. pers.).

Et c'est en définitive la conclusion que l'on peut retenir de ce paragraphe sur la lixiviation des amendements calco-magnésiens, à savoir que leur rémanence dans le sol est tellement fugace, qu'il ne sert à rien de vouloir modifier la réaction acide de façon globale par une fumure de fond, comme cela se pratique couramment en pays tempéré. Mieux vaut s'efforcer, soit de conserver leurs propriétés initiales des sols si elles sont favorables, soit de corriger leurs déficiences par des apports réguliers. Calcium et magnésium apparaissent donc, au même titre qu'azote et potasse, comme devant faire partie des fumures annuelles ou biannuelles.

4. — ACIDIFICATION DU SOL PAR LES ENGRAIS MINÉRAUX

Déjà en 1881, trois agronomes anglais, Lawes, Gilbert et Warrington écrivait : "The action of ammonium salts in impoverishing a soil of lime and magnesia should always be borne in mind when their application to a soil poor in lime is in question". Ils mettaient ainsi en garde contre les pertes de calcium et magnésium générées par les engrais minéraux, ici des sels d'ammonium, pertes d'autant plus dangereuses que le sol est mal fourni en ces éléments, ce qui est le cas de beaucoup de sols tropicaux.

Suivant les conseils de ces agronomes du 19^e siècle, on va s'efforcer de passer en revue un certain nombre de types d'engrais parmi les plus employés en pays tropicaux, afin de mettre en relief leur action sur le pH et l'élimination des bases.

4.1. Le sulfate d'ammoniaque

Le sulfate d'ammoniaque (20,5 % de N) est l'un des engrais azotés les plus utilisés sous les tropiques. Il doit sa faveur à un prix de revient longtemps des plus avantageux, à son hygroscopicité moindre que celle des nitrates et à l'apport simultané d'azote et de soufre. Il a malheureusement une action acidifiante bien connue, liée à la mobilisation des bases qu'il induit et à l'entraînement de celles-ci par les eaux de drainage.

Quelques exemples suffiront à montrer l'ampleur du phénomène :

— En Guinée : le sulfate d'ammoniaque apporté au bananier en sols hydromorphes organiques provoque une baisse annuelle de 0,20 à 0,25 unité-pH pour chaque fraction de 200 kg/ha d'azote (1 000 kg/ha environ de sulfate d'ammoniaque), ceci par rapport au témoin sans engrais (Champion *et al.*, 1958; Dugain, 1959).

— En Côte d'Ivoire : des fumures annuelles nettement plus modestes (200 kg/ha de sulfate d'ammoniaque, soit 40 kg d'azote) mises dans les sols ferrallitiques de Gagnoa cultivés en caféiers robusta induisent une baisse de 0,1 unité-pH en 6 ans par rapport au témoin pour un apport cumulé de 240 kg/ha de N alors que le pH initial était de 5,05 (Verlière, 1967).

— En Ouganda : l'acidification dont est responsable le sulfate d'ammoniaque apporté à la dose annuelle de 260 kg/ha, atteint 0,27 unité-pH par an (Forster, 1970), ce qui rejoint les constatations faites en Guinée :

— Lorsqu'il y a épandage superficiel sans enfouissement, la baisse de pH, extrêmement rapide, se révèle impressionnante : ainsi Blondel (1967 c) a observé sur les deux premiers centimètres du sol, 48 heures après apport de 100 kg d'azote (500 kg de sulfate d'ammoniaque), que le pH de cette pellicule superficielle s'effondrait de 6,4 à 4,8.

Ces variations du pH révèlent un entraînement des bases du complexe absorbant par drainage, entraînement que l'on a essayé de chiffrer.

Tourte *et al.* (1964) ont constaté sous le climat du centre du Sénégal que la lixiviation sous une culture de mil en cases lysimétriques (sol ferrugineux tropical sableux) était de 114 kg/ha de CaO et 27,16 kg/ha de MgO, mais qu'elle atteignait respectivement 156,6 et 45,46 kg/ha après un apport de 80 unités d'azote (sulfate d'ammoniaque).

A la suite d'essais d'engrais divers effectués au Ghana, Ofori (1973) calcule qu'en 19 ans, le sulfate d'ammoniaque apporté à la dose annuelle de 28 kg/ha d'azote (136 kg/ha de sulfate) correspond au départ cumulé de 1,57 milliéquivalent de calcium échangeable pour 100 g de sol et de 0,19 me/100 g de magnésium dans la couche superficielle du sol (soit en prenant comme base 3 000 tonnes de terre à l'hectare, 1 320 kg/ha de CaO et 114 kg/ha de MgO).

Ces diminutions de bases échangeables semblent d'ailleurs varier quelque peu selon les sols, plus d'ailleurs pour le magnésium que pour le calcium, comme l'a constaté Smith (1962) sur des sols de l'Afrique orientale (Kenya, Tanzanie), plantés en théiers (tableau VI.8).

TABLEAU VI.8

Diminution du calcium et du magnésium échangeables d'une tranche de sol de 90 centimètres d'épaisseur à la suite d'apport de sulfate d'ammoniaque dans des plantations de théiers, d'après Smith (1962).

	Tanzanie (2)	Kenya (1)	Kenya (3)
Durée de l'expérience : années	5	8	3
Quantités cumulées de $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$: kg/ha	2 688	2 688	2 016
Ca échang. (témoin) mé/100 g	2,53	1,67	7,34
Ca échang. (objet fumé) mé/100 g	2,05	1,38	6,60
% de diminution	19 %	17 %	10 %
Mg échang. (témoin) mé/100 g	0,79	0,77	2,12
Mg échang. (objet fumé) mé/100 g	0,59	0,71	2,01
% de diminution	25 %	7 %	5 %

L'auteur en conclut que pour compenser la diminution du calcium échangeable, il faudrait apporter par tonne de sulfate d'ammoniaque, respectivement 462, 176 et 607 kilogrammes par hectare d'oxyde de calcium CaO, soit en moyenne 415 kg de CaO ou encore 750 kg/ha de calcaire pur.

Il faut bien préciser qu'il s'agit là du calcium échangeable du sol (qui peut se régénérer partiellement à partir des réserves). En fait, des agronomes travaillant également en Afrique orientale proposent de mettre 1 200 kg de calcaire local simplement pour compenser la lixiviation due à 1 000 kg de sulfate d'ammoniaque (Leutenegger, 1956), ce qui est nettement plus important que la plus forte lixiviation enregistrée sous théier par Smith (*op. cit.*).

Quant au magnésium, Smith (*op. cit.*) met en garde contre la baisse de teneur enregistrée dans le sol, suivi en cela par de nombreux auteurs : Fonseca, Santos et Jésus (1967) dans l'état de Bahia au Brésil; Godefroy, Tisseau, Lossois (1972) en Côte d'Ivoire; Godfrey, Sam, Aggrey (1973) en Sierra Leone, etc.

4.2. Les nitrates et l'urée

Il paraît difficile d'imputer à l'anion SO_4 la seule responsabilité du départ des bases dans les sols. Diverses expériences ont prouvé que tous les engrais

azotés acidifient le sol (1), dans une moindre mesure que le sulfate d'ammoniaque, mais l'acidifient tout de même de façon appréciable: ainsi sous une prairie de pangolagrass en Colombie (Crowder, Michelin et Bastidas, 1964),

- avec 336 kg/ha d'urée, le pH reste stable;
- avec 1 008 kg/ha d'urée, le pH baisse de 6,5 à 5,8;
- avec 4 032 kg/ha d'urée, le pH baisse de 6,6 à 5,0.

- L'apport annuel de 25 kg/ha d'azote dans les sols sableux du Centre du Sénégal fait baisser le pH de 0,12 unité-pH s'il s'agit de sulfate d'ammoniaque, et de 0,10 unité s'il s'agit d'urée (Pieri, 1976 a).

Ces diminutions de pH reflètent bien évidemment l'amenuisement du stock de cations du complexe absorbant du sol.

L'élimination des bases par les eaux de drainage semble se produire en grande partie sous forme de nitrates et surtout de nitrates de calcium; cette opinion avancée à titre d'hypothèse par Tourte et *al.* (1964) pour les sols sableux du Sénégal a reçu depuis de larges confirmations (Roose, 1974, en particulier).

Qu'il s'agisse de l'ammonium apporté directement ou de celui qui est libéré par l'urée, la transformation de l'azote de l'engrais en nitrates se fait avec une extrême rapidité (quelques jours) et il n'est pas possible à la plante d'absorber la totalité de l'anion NO_3^- dès que les doses sont un peu fortes; l'excès est alors éliminé par les eaux de percolation.

Cet inconvénient s'exagère dans le cas de fumure azotée sous forme de nitrate; le temps de latence, même réduit, représenté par la transformation de l'ion ammonium en anion NO_3^- n'existe plus, et ce dernier est évacué hors du profil dès qu'il pleut, en tant que nitrate de calcium, mais aussi de magnésium et de potassium. Ce désavantage, déjà redouté depuis longtemps par les agronomes œuvrant en pays tropical, fut fort bien mis en évidence par Blondel (1971) lors de cultures effectuées dans les sols ferrugineux tropicaux sableux du Sénégal.

4.3. Les autres engrais minéraux

Etant donné la rapidité de la transformation de l'azote, quelque soit sa forme [NH_4 , $\text{C}(\text{NH}_2)_2$], en ion NO_3^- , l'application au sol de sulfate d'ammoniaque d'urée ou de nitrate d'ammoniaque revient, en définitive, à apporter uniquement des anions.

Il n'en est pas ainsi lorsque les balances cations-anions sont équilibrées. L'expérience prouve que nitrate de calcium et cyanamide calcique ne sont pas ou peu acidifiants (Verliere, 1967).

Combinaisons entre un acide fort et une base forte, le chlorure de potassium et le sulfate de potasse sont pratiquement sans effet et sur le pH et sur l'enrichissement des cations (Moulinier, 1962; Tinker et Smilde, 1963; Tourte et *al.*, 1964). Dans la même optique, Kiéserite (SO_4Mg , H_2O) et plâtre (SO_4Ca , $2\text{H}_2\text{O}$) sont légèrement acidifiants, les bases correspondantes $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ étant « faibles » par rapport à l'acide combiné (SO_4H_2).

Quant aux phosphates tricalciques, sels neutres, on a voulu les utiliser comme amendement afin de constituer une sorte de tampon calcique dans

(1) Acidification constatée avec urée ou cyanamide sous bananier en Guinée (Champion, Dugain, Dommergues et Maignien, 1958) et au Cameroun (Dugain, 1960), sous caféier en Côte d'Ivoire (Moulinier, 1962), sous mil et arachide au Sénégal (Poulain, 1967), etc.

le sol, ce qui fut recommandé au Sénégal à des doses allant de 400 à 750 kg par hectare (Tourte et *al.*, 1967, Charreau et Fauck, 1970). Par la suite, on a constaté dans ce pays que, s'il y avait bien une tendance à la stabilisation du pH (Poulain, 1967), le phosphate tricalcique était, à terme, incapable à lui seul d'empêcher la réaction du sol de baisser et donc de compenser entièrement les pertes de calcium et de magnésium qui se produisent sous cultures (Pieri, 1976 b).

On peut ajouter pour compléter cette revue que phosphates mono et bicalcique, super-triple, phosphate d'ammoniaque, moins équilibrés dans leur balance cations-anions devraient être légèrement acidifiants. En fait aux faibles doses habituellement employées par les utilisateurs, on ne décèle guère d'effet de ce genre.

4.4. Discussion

Si l'on pouvait se passer d'engrais azotés, on devrait arriver à supprimer la majeure partie des pertes par lixiviation qui résultent des fumures purement chimiques.

Le fumier de ferme et les amendements organiques du type gadoues pourraient être d'excellents substituts, mais leurs faibles disponibilités, ou leur prix, interdisent actuellement un large emploi.

Faute de mieux, il est recommandé de compenser les pertes prévisibles par des amendements calco-magnésiens (1, 2 kg de calcaire broyé par kilogramme de sulfate d'ammoniaque par exemple). Ceci se heurte, en pratique, au manque de motivation et surtout aux disponibilités financières insuffisantes du paysan. Une solution serait évidemment d'offrir sur le marché des engrais vraiment complets, c'est-à-dire contenant également calcium et magnésium.

On a vu précédemment que les agronomes néozélandais mélangeaient de la serpentine à du superphosphate triple : primitivement conçue pour empêcher le jute de l'emballage d'être rongé par l'engrais, cette opération s'est révélée très profitable sur le plan agricole. Plus récemment, on a tenté de réaliser à Madagascar du nitrate d'ammoniaque en granulés enrobés de dolomie à raison de 150 kilogrammes de dolomie pour 200 kg d'azote (Celton, Roche et Velly, 1973). Malheureusement, les quantités d'amendement calco-magnésien sont insuffisantes et, surtout, le prix de revient est plus élevé que celui des produits pris séparément.

5. — CONCLUSION : INTENSITÉ COMPARÉE DE LA LIXIVIATION EN PAYS TROPICAUX ET EN PAYS TEMPÉRÉS

Sous un climat donné, la lixiviation du calcium et du magnésium peut être scindée en :

- un entraînement « fatal » en profondeur qui affecte même la partie supérieure des sols sous végétation naturelle; son importance est plus ou moins fonction de la richesse du sol en bases et surtout de l'intensité du drainage.
- un entraînement supplémentaire sous culture qui dépend du taux de couverture du sol par les plantes cultivées, (à condition toutefois que la perméabilité du sol ne soit pas affectée par les traitements culturaux).

— un entraînement à la suite d'apport d'engrais chimiques surtout s'il s'agit de composés azotés.

En fait, en dehors des causes aggravantes que peuvent être la mise en culture et la fumure chimique, toute lixiviation est étroitement fonction de la quantité de pluie qui percole à travers le sol.

On pourrait penser que la forte pluviosité des zones équatoriales et la concentration dans le temps des précipitations en climat tropical à deux saisons tranchées contribuent beaucoup à accroître le drainage.

Elles le favorisent largement, c'est certain, mais comme on peut le constater sur le tableau VI.9, les pays tempérés, à pluviométrie plus faible mais à évaporation limitée par un climat plus froid et une nébulosité souvent importante, ne le leur cèdent en rien dans certain cas, du point de vue de l'intensité de la lixiviation du calcium et du magnésium.

TABLEAU VI.9
Lixiviation annuelle du calcium et du magnésium
en pays tropicaux et en pays tempérés

Localisation	Traitement du sol	Pluvio- métrie mm	Drai- nage mm	Lixiviation kg/ha		Source
				CaO	MgO	
Sénégal Bambey (Cases lysimé- métriques)	Rotation culturale sans engrais	660	128	43	22	Charreau (1972)
	Rotation culturale avec engrais	660	137	42	19	
Côte d'Ivoire (sol non perturbé) Divo Anguédougou Adiopodoumé	Forêt	1 750	550	154	142	Roose (1970-a)
	Hévéa	1 569	845	44	67	Roose (1970-b)
	Prairie fauchée de <i>Panicum</i> avec engrais et dolomie	1 584	697	219	35,8	Roose et Talineau (1973)
	Prairie fauchée et <i>Stylosanthes</i> avec engrais et dolomie	1 584	571	134	26,9	Roose et Talineau (1973)
Azaguié	Bananier avec engrais et dolomie	1 600 +200 (irriga- tion)	450 à 680	365	149	Godefroy, Roose, Muller (1975)
France (cases lysimé- triques) Quimper Versailles	Sol nu	1 089	563	434	39	Coppenet (1969)
	Sol nu	595	217	407	28	"
	Cultures	595	152	251	17	"
Angleterre Berkshire (monolithes)	Prairie de graminées	663	51,5	96	41	Low et Armitage (1970)
	Prairie de trèfle	663	52	59	6,1	
	Sol nu	663	88	330	72	

Ce qu'il y a de grave en conditions tropicales, c'est que ces pertes affectent des sols habituellement mal pourvus en calcium et magnésium. Elles y seront beaucoup plus durement ressenties que dans les rendzines de Champagne, mais guère plus que dans les sables podzolisés des Landes. Il faut ajouter que sous les tropiques, les réserves sont bien souvent faibles surtout en calcium, d'où de maigres possibilités de régénération des éléments échangeables.

A ces facteurs défavorables s'ajoute au passif des pays tropicaux, l'absence de traditions ou la méconnaissance des techniques visant à la conservation et à la restitution de la chaux et de la magnésie dans les terres cultivées.

**L'appauvrissement global
en calcium et magnésium des sols cultivés
Importance de l'érosion et des exportations
Quelques palliatifs**

**1. — CAUSES DES PERTES EN CALCIUM
ET MAGNÉSIUM SOUS CULTURES
AUTRES QUE LA LIXIVIATION**

La lixiviation représente certainement une des causes importantes de la chute des teneurs en calcium et magnésium échangeables de la partie superficielle des sols, mais lorsqu'il y a culture, d'autres facteurs concourent à cet appauvrissement.

1.1. L'érosion

La destruction du couvert végétal naturel entraîne pendant les périodes où le sol est nu ou mal couvert l'apparition de ruissellement générateur d'érosion : Roose (1973) a calculé qu'en Côte d'Ivoire, les pertes en terre, très faibles sous savane ou forêt (0,2 tonne par hectare et par an), croissent de 120 t/ha/an sur des pentes de 7 % et à 600 t/ha/an sur des pentes de 25 %, lorsque le sol est dépouillé de sa couverture végétale.

Des décapages annuels par érosion en nappe de 20 tonnes de terre par hectare, malheureusement assez habituels dans les champs d'ignames ou de manioc de ce pays, conduisent à l'enlèvement de 71 kg/ha de CaO et 23 kg/ha de MgO correspondant à peu près à 240 kilogrammes de dolomie (Roose, 1967), pertes du même ordre de grandeur que celles dues aux exportations d'une récolte de 40 tonnes de racines, soit 20 kg/ha de CaO et 72 kg/ha de MgO (Velly, 1967). On a calculé, pour les terres cultivées des Etats-Unis, qu'en moyenne la disparition de l'ensemble des nutriments minéraux par suite des phénomènes érosifs était presque constamment supérieure aux prélèvements par les récoltes, mais que la disproportion s'exagérait en ce qui concerne le calcium et le magnésium : 152 kg/ha de Ca et 73,0 kg/ha de Mg enlevés par l'érosion contre

respectivement 6 kg / ha et 2 kg / ha par les récoltes (Swanson, 1955). Les faibles teneurs en éléments minéraux des sols tropicaux leur interdisent en général d'arriver à de telles « performances », mais on peut craindre des dégâts considérables, qui, en fait, ne sont que trop réels en certaines régions.

Fort heureusement, comme on le verra dans la troisième partie de ce chapitre, les techniques de contrôle de l'érosion sont actuellement assez au point pour que l'on puisse atténuer les processus érosifs de telle sorte qu'ils ne présentent plus un danger immédiat. Mais la difficulté consiste à les faire entrer dans la pratique agricole de tous les jours.

1.2. Les exportations par les récoltes

Il suffit de se reporter au tableau III.1 (chap. III) pour apprécier les quantités de calcium et de magnésium exportées par les récoltes.

Faibles en valeur absolue pour les graminées lorsque seul le grain est récolté, elles croissent beaucoup si on enlève en même temps les pailles, sans qu'il y ait restitution ensuite par le fumier de ferme, cas courant sous les tropiques. Bien souvent les pailles, comme d'ailleurs les fanes d'arachides, sont consommées sur place par les animaux, et les quelques excréments qu'ils laissent ne compensent pas ce qu'ils absorbent.

Les racines et tubercules exportent nettement plus de calcium et de magnésium, mais tout de même beaucoup moins que les fourrages récoltés en vert.

Quant aux cultures dites industrielles, la situation peut varier sensiblement selon que la majeure partie de la plante est enlevée (cas de la canne à sucre) ou qu'il s'agit simplement de la graine (cas du caféier); le latex de l'hevea est, à ce point de vue, pratiquement sans conséquences sur le contenu minéral du sol, puisque 1 700 kilogrammes de gomme (forte production annuelle pour un hectare) ne contiennent que 0,03 kg de calcium et 2,5 kg de magnésium (élément) selon Shorrocks (1965 c).

2. — QUELQUES ESSAIS DE BILANS DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DANS LES SOLS TROPICAUX

Les bilans font intervenir ensemble tous les facteurs qui contribuent à la diminution des teneurs en calcium et magnésium des sols.

2.1. Cas des cultures traditionnelles de Casamance (Sud du Sénégal)

D'après Siband (1972) — Sols ferrallitiques faiblement désaturés et sols ferrugineux tropicaux.

On a l'habitude d'opposer les pratiques culturales traditionnelles, en principe conservatrices de la fertilité du sol, aux techniques agricoles modernes d'intensification souvent accusées d'être dévastatrices. L'exemple cité par Siband (*op. cit.*) montre que l'agriculture pratiquée selon des procédés ancestraux n'est pas toujours aussi conservatrice que l'on veut bien le dire.

Dans cette région de haute Casamance (Sud du Sénégal), les populations ont l'habitude, après défrichement de la forêt sèche, de pratiquer des successions

culturales arachide-mil jusqu'à ce que, pour une raison quelconque (érosion, envahissement par les adventices, dégradation des caractéristiques physiques et chimiques du sol,...), les rendements faiblissent par trop. On laisse alors s'installer une jachère herbacée que l'on défriche à nouveau, quelques années plus tard, ces « quelques années » pouvant signifier tout autant 2 à 3 ans que 30 ou 40 ans; la remise en culture est en effet apparemment d'avantage fonction des contingences locales (éloignement du village, pression démographique, etc...) que de la reconstitution de la fertilité que l'agriculteur aurait la possibilité d'apprécier par la vigueur de la végétation. En fait, actuellement, la durée de la jachère a tendance à se raccourcir en moyenne dans des proportions notables.

On a groupé sur le tableau VII.1 l'ensemble des données concernant le complexe absorbant, données recueillies par Siband (*op. cit.*) en fonction de l'âge de la première défriche.

TABLEAU VII.1

Evolution du complexe absorbant et du pH de l'horizon de surface (0-10 cm) d'un sol de Haute Casamance en fonction de l'âge de la première défriche, d'après Siband (1972), cité par Charreau (1972)

Age de la première défriche	pH	Ca mé/100 g	Mg mé/100 g	K mé/100 g	SBE mé/100 g	T mé/100 g	V %
Forêt (terrain)	6,3	5,0	1,7	0,07	6,8	7,2	87
3 ans	6,0	2,7	1,2	0,07	4,2	5,2	81
12 ans	5,9	2,2	1,0	0,04	3,2	3,7	86
46 ans	6,0	1,4	0,5	0,05	2,0	3,8	53
90 ans	5,9	1,0	0,5	0,05	1,6	2,5	64

On s'aperçoit qu'il y a une chute progressive des taux calcique et magnésien, de telle sorte qu'au bout de 90 ans (trois à quatre générations humaines), le sol a perdu environ les quatre cinquièmes de son calcium et les deux tiers de son magnésium. Les exportations par les récoltes et surtout l'érosion ont certainement contribué pour une part importante à cette chute, mais la lixiviation n'en a pas moins joué un rôle déterminant malgré le climat relativement sec (1 200 mm de pluie répartis sur 5 à 6 mois), puisqu'entre la 2^e et la 16^e année après la première défriche, le calcium provenant de l'horizon superficiel se retrouve pour un tiers entre 10 et 40 cm; après 16 ans, cette « accumulation » relative disparaît, éliminée hors de cette tranche de sol par le drainage.

2.2. Cas de la culture arachidière au Sénégal

La culture de l'arachide s'effectue le plus fréquemment, au Sénégal, sur des sols ferrugineux tropicaux sableux (2 à 10 % d'argile), assez bien saturés en bases, à pH de l'ordre de 6,5 (en sol vierge). L'arachide y alterne habituellement avec du mil.

Une expérience en lysimètres (Tourte et *al.*, 1964) permet de préciser l'origine du calcium et du magnésium perdus par ce sol sableux, — 2 à 3 % d'argile —, sous ce climat semi-aride (pluviométrie 800 mm, drainage 150 mm) et sous ces deux cultures (tableau VII.2); tout d'abord, les exportations par l'arachide, 115,6 kg/ha de CaO, 37,4 kg/ha de Mg (moyenne calculée sur les six objets) restent constamment supérieures aux pertes par lixiviation, 57 kg/ha de CaO et 9,7 kg/ha de MgO (moyenne des 6 objets). On peut noter que l'apport de 142 kilogrammes de chlorure de potassium par hectare n'a aucun

effet significatif sur l'intensité de la lixiviation, mais, par contre, on s'explique mal que le mil engrais vert enfoui préalablement ait accru de 50 % environ ce dernier phénomène.

TABLEAU VII.2

Lessivage et exportations de calcium et de magnésium
au cours de cultures de mil et d'arachide
en sol ferrugineux tropical sableux (Dior) du Sénégal
Expérience en lysimètres. D'après Tourte et *al.* (1964)

Type de la jachère (précédant la culture)		Après mil engrais vert enfoui		Après jachère herbacée enfouie		Après jachère herbacée brûlée	
		Lix.	Exp.	Lix.	Exp.	Lix.	Exp.
Arachides	CaO kg/ha	72	114	54	106	40	113
	MgO kg/ha	16	36,5	9	35	4	42
Arachides avec 85 kg/ha de K ₂ O (KCl)	CaO kg/ha	71	130	55	105	50	126
	MgO kg/ha	13	38	10,5	30	6	43
Mil grain avec 88 kg/ha de CaO	CaO kg/ha	111	32	120	30	111	40
	MgO kg/ha	22	9,1	29,3	6	30,2	7
Mil grain avec 88 kg/ha de CaO et 60 kg/ha de N (SO ₄ (NH ₄) ₂)	CaO kg/ha	149	63	163	62	158	86
	MgO kg/ha	45	17	48,4	15,5	43	26
Lix. = Pertes par lixiviation.		Exp. = Exportation par les récoltes.					

Le mil exporte en moyenne 34 kg / ha de CaO et 7,3 kg / ha de MgO sans engrais azoté, contre 70 kg/ha de CaO et 19,5 de MgO/après apport de 300 kg/ha de sulfate d'ammoniaque (1), ce qui reflète bien l'accroissement de rendement obtenu avec cet engrais. Quant à la lixiviation sous cette culture, elle est forte, surtout pour le calcium, en raison, semble-t-il, et de l'apport de 88 kg/ha de CaO sous forme de phosphate Baylifos, (pertes de 114 kg/ha de CaO, 27,3 de MgO) et surtout de la combinaison 88 kg/ha CaO (Baylifos) et 60 kg/ha de N (sulfate d'ammoniaque), soit alors des pertes de 156 kg/ha de CaO et 45,4 kg/ha de MgO. Que le mil ait reçu ou non un engrais azoté, les pertes totales du sol en calcium lors de cette culture sont toujours supérieures à l'apport qui est, rappelons-le, de 88 kg/ha de CaO. Le bilan du calcium (apport dont on soustrait la somme de la lixiviation et des exportations) reste négatif au cours des quatre années de la rotation engrais vert — arachide — mil — arachide, même avec un amendement de 200 kg/ha de CaO (sous forme de 500 kg/ha de phosphate Baylifos à 40 % de CaO).

Il est toujours délicat de transposer au champ en vraie grandeur des conclusions tirées d'une expérience sur lysimètres. Quelques exemples permettent pourtant de se rendre compte que le sens des observations pessimistes de Tourte et *al.* (*op. cit.*) reste valable.

(1) Il ne faut pas perdre de vue que le mil est semé dans ces lysimètres à une densité nettement supérieure (trente fois environ) à ce que l'on observe couramment en plein champ.

Lors de cycles culturaux du même type que précédemment sous un climat analogue (800 mm de pluie environ), mais sur des sols ferrugineux tropicaux un peu mieux fournis en argile (9 % au lieu de 2 à 3 %), on a observé (Bouyer, 1959) en 9 ans de culture (1951 à 1958) que :

- la somme des bases échangeables passe de 1,90 à 1,40 me/100 g
- le calcium échangeable diminue de 1,08 à 1,00 me/100 g.
- le magnésium échangeable diminue de 0,69 à 0,30 me/100 g
- le pH initialement de 6,5 se retrouve à 5,8.

Ici la péjoration des caractéristiques du complexe absorbant affecte surtout le magnésium échangeable et le pH dont la baisse est considérée comme la plus alarmante. Il faut noter que ce sol a reçu fort peu d'engrais chimiques (150 kg/ha tous les deux ans d'un mélange 6-20-10 à base de sulfate d'ammoniaque, phosphate bicalcique, chlorure de potasse), de faibles apports de calcium, environ 6 kg / ha de CaO tous les 2 ans, étant inclus dans cet engrais.

C'est à des conclusions encore plus pessimistes qu'arrivent Fauck, Moureaux et Thomann (1969), après 15 ans de culture mécanisée avec des rotations en gros similaires, sur des sols sablo-argileux (13 % d'argile en surface) du sud du Sénégal (Casamance) : le sol « beige », ferrugineux tropical, a perdu 70 % de son calcium échangeable et le sol « rouge », ferrallitique faiblement désaturé, 50 % ; les pertes en magnésium échangeable sont du même ordre (50 %) pour les deux types de sol ; quant au pH il passe de 6,4 sous forêt à 4,6-5,1 après 15 années de culture. En définitive, d'après les auteurs, les deux paramètres critiques sont, dans ce cas, le pH et le calcium échangeable (1 me/100 g de sol, en moyenne) qui atteignent les seuils inférieurs admissibles pour l'arachide. En ce qui concerne plus précisément le calcium, la diminution de la fraction échangeable s'accompagne d'un amenuisement inquiétant des réserves calciques (estimées par l'acide nitrique bouillant), ce qui n'est pas encore le cas pour le magnésium.

Il ne s'agit dans tout ce qui précède que des sols « suivis » année après année par les agronomes et chimistes, mais le même phénomène se retrouve dans toutes les terres du Sénégal cultivées depuis un certain temps et en particulier dans le vieux « bassin arachidier » de la zone Thiès - Diourbel ; aussi est-ce un véritable cri d'alarme que lance Pieri (1976 a et b) en constatant que les baisses de pH risquent de provoquer à courte échéance, ou provoquent même déjà, l'apparition d'aluminium échangeable avec, d'abord dépression des rendements, puis anéantissement des cultures d'arachide, respectivement pour $\text{pH} \leq 5,5$ et $\text{pH} \leq 5,0$ (le mil étant nettement moins sensible). Cet auteur estime à 430 000 hectares les terres « acidifiées » du Sénégal et à 27 000 tonnes de CaO le tonnage des amendements calcaires à épandre annuellement simplement pour conserver, ou ramener, le pH entre 5,5 et 5,8.

On pourrait ajouter qu'il serait bon d'y mêler un peu de magnésium, car certaines données analytiques montrent que les teneurs en magnésium échangeable se trouvent, en certains points de ce pays, au voisinage ou en dessous du seuil de déficience situé habituellement vers 0,25 - 0,30 me/100 g dans les sols à caractère sableux ; et le seuil de carence sera peut-être atteint rapidement si la culture se prolonge.

2.3. Cas des rotations culturales du centre de la Côte d'Ivoire (Bouaké)

Plus réconfortantes que celles du Sénégal sont les expériences à long terme (10 ans) de culture mécanisée menées à Bouaké en Côte d'Ivoire. Les précipitations y sont faibles pour la latitude (1200 mm) et étalées sur 8 à 9 mois (d'où la possibilité de faire deux cycles de cultures par an). De ce fait, le drainage (calculé) est peu important (100 mm).

Les sols, considérés comme intermédiaires entre les ferrallitiques et les ferrugineux tropicaux, sont peu profonds et riches en bases; ils contiennent souvent dans la partie moyenne et inférieure du profil des éléments de la roche-mère (muscovite). Ajoutons que des pratiques culturales bien adaptées ont pratiquement éliminé toute érosion.

Au cours de rotations avec deux cycles culturaux chaque année incluant igname, maïs, coton, arachide, riz pluvial et *Stylosanthes gracilis* enfoui comme engrais vert un an sur trois ou quatre, Le Buanec (1972) ne trouve aucune différence significative entre 1960 et 1969 pour le pH et la somme des bases échangeables (1), comme d'ailleurs pour la matière organique et le phosphore; en outre les rendements ont progressé du fait du perfectionnement des techniques. Si les fumures minérales (N.P.K.) furent calculées au plus juste (de l'ordre des exportations par les récoltes), on a restitué au sol tous les résidus de récolte : fanes d'ignames et d'arachides, pailles de maïs et de riz...

Lorsqu'il y a eu d'abord 2 cultures d'ignames puis chaque année pendant 8 ans la succession maïs (1^{er} cycle) - coton (2^e cycle), on a enregistré (Bouchy, 1973), les deux premières années une baisse brutale du magnésium, seul cation suivi régulièrement, puis une sorte de stabilisation de 1963 à 1970, avec toutefois une tendance à une décroissance légère pour la culture témoin (sans fumure), plus marquée s'il y a eu apport d'engrais minéraux; par contre dans les objets qui ont reçu du fumier (fumier bien décomposé et fumier pailleux), les variations de magnésium échangeable ne sont pas significatives entre ces deux dates (tableau VII.3). Quant au calcium, Bouchy (*op. cit.*) estime, en l'absence de données analytiques systématiques, qu'il a subi une évolution analogue. Il pense qu'un apport de dolomie, au moins sur l'objet « fumure minérale », serait le bienvenu. On peut dans ce cas précis incriminer la faiblesse des restitutions par les résidus de récolte qui ne concernent guère que les pailles de maïs (si elles ont eu lieu) puisque les tiges, branches et pivots des cotonniers sont enlevés et brûlés pour éviter le parasitisme.

TABLEAU VII.3

Evolution du magnésium échangeable (me/100 g de sol)
dans un sol de Bouaké (Côte d'Ivoire) cultivé en maïs et coton
avec diverses fumures entre 1962 et 1970, d'après Bouchy (1973)

Année	0 Témoin s. fumure	E Fumure minérale NPK	F Fumier décomposé	FP Fumier pailleux	F + E	FP + E
1961 (avant cult.)	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
1963	1,10	1,26	1,13	1,22	1,13	1,25
1965	1,16	1,31	1,23	1,27	1,48	1,44
1969	1,19	0,96	1,29	1,41	1,09	1,20
1970	1,04	0,78	1,17	1,36	1,12	1,27

On peut ajouter que cet essai concerne un sol fort bien pourvu à l'origine en bases (Ca, 13,6 me/100 g, Mg 2,18 me/100 g); après 9 à 10 ans de cultures,

(1) Une telle stabilité du calcium et du magnésium sous cultures, encore que peu fréquente, n'est pas exceptionnelle : Stephens (1969) n'a observé aucune baisse significative de Ca et Mg échangeables dans neuf sols de l'Ouganda (huit ferrallitiques et un brun eutrophe) après 4 ans de cultures diverses en rotation : maïs, haricots, patate douce, mil, arachide, sorgho, coton...

il possède encore un niveau magnésien, et probablement aussi calcique, très honorable par rapport à beaucoup d'autres sols de même type, même ne portant pas de cultures !

2.4. Bilan du calcium et du magnésium sous cultures fourragères dans le Sud de la Côte d'Ivoire (Roose et Talineau, 1973)

Des prairies de *Panicum maximum* et *Stylosanthes gracilis* établies sur les sols ferrallitiques fortement désaturés, sablo-argileux de basse Côte d'Ivoire ont reçu comme fertilisation azotée et potassique :

- dose 1 : limitée à un apport initial de 25 kg/ha de N 25 kg/ha K₂O;
- dose 2 : apport après chaque coupe (8 à 10 fois par an pour le panicum, 4 à 6 fois pour le stylosanthes), de 50 kg/ha de N et K₂O;
- dose 3 : apport après chaque coupe de 100 kg/ha de N et de K.

Outre du phosphore, chacun des objets a reçu du calcium et du magnésium (sous forme de chaux magnésienne) en quantités variables, suivant les objets, dont on verra le détail sur le tableau VII.4;

TABLEAU VII.4

Bilan du calcium et du magnésium du sol en 3 années de cultures fourragères à Adiopodoumé (Côte d'Ivoire), d'après Roose et Talineau (1973).

Balance du magnésium (kg/ha/3 ans)

Niveau de fertilisation	Apports : Mg			Pertes : Mg				Balance	
	Pluie	Engrais	Total	Exportation	Lixiviation	Ruissellement	Total	Mg	MgO
<i>Panicum maximum</i> 1	21	29	50	135	19,2	0,6	155	- 105	- 175
2	21	232	253	216	43,7	0,2	200	- 7	- 11,6
3	21	232	253	327	107,6	0,2	435	- 182	- 303
<i>Stylosanthes guyanensis</i> 1	21	29	50	141	28,6	1,4	171	- 121	- 201
2	31	116	137	180	76,0	1,5	258	- 121	- 201
3	21	116	137	159	80,7	2,0	242	- 105	- 175

Balance du calcium (kg/ha/3 ans)

Niveau de fertilisation	Apports : Ca			Pertes : Ca				Balance	
	Pluie	Engrais	Total	Exportation	Lixiviation	Ruissellement	Total	Ca	CaO
<i>Panicum maximum</i> 1	90	69	159	144	123	1,7	269	- 110	- 154
2	90	672	762	205*	215*	0,2	420	342*	479
3	90	912	1 002	392	659	0,5	1 052	- 50	- 70
<i>Stylosanthes guyanensis</i> 1	90	54	144	379	182	3,6	565	- 421	- 589
2	90	336	426	631	438	4,1	1 073	- 647	- 906
3	90	456	546	521	402	3,8	927	- 381	- 533

* Le niveau des exportations et lixiviations est relativement plus faible que ce à quoi on pouvait s'attendre : problème d'équilibre cationique probablement (d'après les auteurs).

Comme on pouvait s'y attendre, les exportations croissent assez sensiblement dès que la fumure accroît les rendements en fourrage. Quant à la lixiviation (1), son intensité augmente si on passe de la dose 1 aux doses 2 et 3 qui apportent des quantités nettement plus fortes de calcium et de magnésium. En fait, le bilan est négatif dans presque tous les cas (sauf un, mal expliqué d'ailleurs), et ceci malgré une pluviométrie déficitaire par rapport à la normale.

Les auteurs concluent que calcium et magnésium des fumures sont mal utilisés par la plante et se fixent difficilement sur un sol pourtant désaturé au départ.

2.5. Diminution des bases échangeables des sols sous plantations de cacaoyers

Wessel (1967) a testé les sols des cacaoyers de la station de Gambaru (Nigéria méridional) en fonction de l'âge des plantations. Bien que ce type de culture soit considéré comme « conservateur » de la fertilité, on n'en note pas moins (Tableau VII.5) une diminution progressive des taux de calcium et de magnésium; au bout de 33 ans le sol a perdu à peu près la moitié du calcium et un tiers du magnésium échangeables.

TABLEAU VII.5

Evolution du pH, du calcium et du magnésium échangeables du sol en fonction de l'âge des cacaoyers (Nigéria). D'après Wessel (1967).

Age	pH	Ca échan. mé/100 g	Mg échan. mé/100 g
0 (forêt)	6,8	15,0	2,3
3 ans	6,7	13,9	1,5
5 ans	6,6	13,6	1,6
9 ans	6,5	11,3	1,6
11 ans	6,7	13,9	2,0
15 ans	6,6	11,8	2,0
24 ans	6,3	8,6	1,7
33 ans	6,4	7,8	1,5

La situation finale n'a rien de dramatique étant donné l'exceptionnelle richesse initiale de ce sol (Ca 7,8 me/100 g, Mg 1,5 me/100 g, pH 6,4).

Dans un terroir un peu moins bien pourvu, semble-t-il, Boyer Ja. (1973) a calculé que, dans les cacaoyères du Cameroun âgées de 33 ans, le calcium et le magnésium disponibles (sol sur 1 m de profondeur, litières et organismes végétaux, apport par les pluies) étaient respectivement 1 000 fois et 500 fois supérieures aux exportations annuelles des cacaoyers.

Il n'en reste pas moins que les cultures pérennes provoquent, elles aussi, un affaiblissement assez sensible des stocks calciques et magnésiens du sol; ce phénomène se produit beaucoup plus lentement que lors des cultures annuelles, mais il est tout de même net.

(1) A noter qu'ici les quantités de calcium et de magnésium lixiviés ne sont pas appréciées par l'analyse des éléments échangeables du sol, mais mesurées dans les eaux de drainage recueillies à 1,50 m de profondeur suivant la méthode décrite par Roose et Henry des Tureaux (1970).

3. — PROCÉDÉS AGRONOMIQUES DESTINÉS A RÉDUIRE OU A COMPENSER LA LIXIVIATION DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM

Les agriculteurs et agronomes ont essayé de tout temps de préserver la fertilité des sols pendant le déroulement des cultures, et ceci concerne bien sûr, le calcium et le magnésium.

Les exportations par les récoltes ne sont pas, par définition, compressibles; et il faut même souhaiter qu'elles augmentent dans la mesure où cela signifie une meilleure productivité et du sol et du travail agricole. Par contre, il est possible d'atténuer, sinon de supprimer les pertes par érosion et lixiviation et ceci par divers procédés.

3.1. Les systèmes culturaux traditionnels

Les systèmes culturaux traditionnels tels qu'ils furent longtemps pratiqués impliquent de longues jachères forestières intercalées entre des périodes de culture relativement courtes. La culture itinérante devrait, en principe, s'accompagner de déplacements périodiques des villages comme cela se pratique encore chez certaines ethnies d'Amérique du Sud, du sud-est asiatique et d'ailleurs... Plus souvent c'est de culture semi-itinérante qu'il faudrait parler, car les villages étant fixés, seules les cultures changent d'emplacement sur le périmètre accessible sans déplacements trop longs (jusqu'à une vingtaine ou une trentaine de kilomètres parfois). Temps de culture limité à quelques années (2 à 3 ans), défrichements incomplets, associations de plantes diverses couvrant le sol au maximum, puis longues jachères concouraient au maximum au maintien de fertilité, tout en fournissant un revenu médiocre, mais suffisant pour assurer la subsistance des hommes.

C'est du moins le schéma, un peu idéalisé, que l'on a l'habitude de présenter. Il ne faut pas trop se leurrer sur son efficacité et surtout sur l'universalité de cette efficacité; les traditions ancestrales peuvent être diverses, mauvaises ici, excellentes ailleurs; si certaines zones de l'Amazonie péruvienne se trouvent transformées en landes à fougères, — que la forêt recolonise fort mal —, à la suite de défrichements mal conduits (Scott, 1973), « à contrario » quelques populations du Nord Cameroun, du Togo, etc. ont développé des systèmes remarquablement conservateurs de la fertilité (pratiques anti-érosives, restitution au sol des déchets de toutes sortes...). A noter que ces agriculteurs si évolués oublient vite ces techniques améliorées lorsqu'ils quittent leurs montagnes-refuge pour s'établir dans la plaine voisine; c'est en quelque sorte la même évolution de mentalité que celle qui a fait des colons nord-américains, pourtant descendants des paysans « ultra-conservateurs du sol » d'Europe occidentale, des adeptes de l'agriculture « minière ». Les immenses étendues, apparemment vides, donnent toujours à l'homme l'impression que le capital sol est illimité; et il a tendance de ce fait à le dissiper allègrement.

Quoiqu'il en soit, on assiste un peu partout, de par le monde dit « en voie de développement », à une réduction du temps de jachère sous l'influence de deux facteurs qui conjuguent leurs effets: la pression démographique et l'introduction de cultures « de rente » à but commercial. Dans les pays à forte densité de population, (ouest-Sénégal, Nigeria, Nord Cameroun, Rwanda, Burundi, etc. pour s'en tenir à l'Afrique), la durée de la friche se réduit à tel point que la végétation arborée, et même arbustive, n'a plus le temps de

se réinstaller, avec toutes les conséquences que cela implique pour la fertilité : l'herbe qui les envahit alors n'a pas le même pouvoir de remontée des éléments minéraux entraînés en profondeur, et, en outre, la remise en culture intervient de plus en plus rapidement. L'exemple donné par Siband (1972) est particulièrement significatif à cet égard (Tableau VII.1). En certains points d'Afrique occidentale, la durée de la jachère ne dépasse guère le quart de celle des cultures (Charreau, 1972).

3.2. Quelques procédés de conservation de la fertilité du sol en culture intensive et semi-intensive

Le concept « fertilité » d'un sol englobe une série de facteurs qu'il n'est pas facile de séparer. Bien que ce choix soit artificiel, nous ne retiendrons ici que les techniques qui agissent pour la conservation du calcium et du magnésium du sol et en particulier celles qui réduisent leur entraînement soit en surface (érosion) soit en profondeur (lixiviation). Ce qui ne veut pas dire que ces procédés ne soient pas bénéfiques pour d'autres caractéristiques physiques ou chimiques des sols.

La lutte mécanique contre l'érosion

On sait actuellement maîtriser l'érosion par un certain nombre de procédés, bandes d'arrêt, cultures en bandes alternées (Le Buanec, 1972) et même banquettes (cas de la plantation d'hévéas de Côte d'Ivoire cité par Roose, 1970.b).

En cultures sarclées, le billonnage en sillons isohypses, surtout s'il s'accompagne d'un cloisonnement de ces billons, arrive à supprimer tout ruissellement (Bertrand (1967) en Côte d'Ivoire, Peat et Brown (1960) en Tanzanie, etc.). L'efficacité de ces pratiques dépend du type de sol : assez aléatoire dans les sols sablo-argileux « battants » de Casamance et du Nigéria septentrional dès que la pente dépasse 1 % sans aménagement et 3 % avec des banquettes (Cointepas, 1956; Roose, 1967.b; Palmer, 1958), elle reste bonne dans les sols ferrallitiques jusqu'à une forte déclivité (12-15 % dans l'est du Zaïre pour des banquettes, parfois 30 % s'il s'agit de cultures de pyrèthre selon Delhay, 1968) ainsi que dans les andosols (22 % de pente au Cameroun d'après Rochette, 1959).

Le paillis est aussi un excellent moyen de combattre l'érosion : même d'épaisseur réduite, quelques millimètres, il suffit à éviter un ruissellement dévastateur (Fournier, 1967; Roose, 1967).

Tous ces procédés sont bien connus, mais la grande difficulté consiste à les introduire dans la pratique agricole de tous les jours (Roose, 1967.b).

Couverture maximale du sol par les plantes

Une couverture végétale dense et de belle venue à l'avantage, en plus de son intérêt pour lutter contre l'érosion, d'engendrer une évapo-transpiration importante qui réduit d'autant le volume des eaux de drainage.

Dans ce domaine, les plantes pérennes (caféiers, cacaoyers, hévéas, palmiers à huile,...) associées à une légumineuse rampante ou non, rétablissent en quelque sorte le climax forestier originel, en principe optimum.

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

— Semer tôt, dès les premières pluies, afin de limiter au maximum la période où le sol est nu ou quasi nu (Akehurst et Sreedharam, 1965; Macartney et al., 1970, en Tanzanie; Charreau, 1972 pour l'Afrique occidentale).

— Dans le même but, favoriser la pousse par un haut niveau de fertilité, renforcé au besoin par des fumures organiques et minérales (Bailly et al., 1967; Le Buanec, 1972, etc...).

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

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

— Choisir, lorsque c'est possible, des plantes sous lesquelles le sol s'érode peu (Roose, 1973).

Il est plus facile d'énoncer ces principes que d'arriver à les mettre en œuvre année après année. Dans le meilleur des cas, si on réussit à atténuer les pertes, on ne peut guère empêcher un certain appauvrissement du sol en nutriments divers, dont le calcium et le magnésium.

Le fractionnement et le choix des engrais azotés

Lorsqu'on fait un apport de nutriments au sol par engrais chimiques, il est toujours intéressant de fractionner les apports pour les adapter dans la mesure du possible aux besoins des plantes et ainsi diminuer les pertes.

Cette remarque est particulièrement valable pour les engrais azotés, dont on sait que toutes les formes aboutissent à l'anion nitrate particulièrement sensible à l'entraînement par drainage sous forme de sels calciques et magnésiens principalement. D'où le fractionnement très généralement recommandé pour les cultures sarclées : la moitié de la dose au semis, la seconde moitié en couverture lorsque la plante a de gros besoins (par exemple un peu avant le début de la floraison pour le cotonnier); en culture bananière, on en est arrivé à sept épandages annuels..., ce qui implique un important surcroît de dépense.

Cette technique a donné de bons résultats sur le *Panicum maximum* de Côte d'Ivoire traité en prairie fauchée : le bilan de l'azote du sol est positif pour les plus fortes doses d'engrais azotés (1 063 et 2 065 kg/ha de N en 3 ans sous forme d'urée et de sulfate d'ammoniac) alors qu'il est négatif pour la plus faible (163 kg/ha/3 ans) selon Roose et Talineau (1973).

Les formes des engrais azotés ont aussi leur importance : l'urée et les composés ammoniacaux sont préférables aux nitrates très sensibles à la lixiviation.

L'idéal serait d'employer l'azote organique (fumier par exemple) le plus stable; ce n'est malheureusement que trop rarement possible.

3.3. Enrichissement du sol en calcium et magnésium autrement que par les amendements calco-magnésiens minéraux

On n'étudiera ici que les restitutions faites par les couvertures végétales vivantes, les paillis, fumiers et déchets de récoltes, l'apport par amendements calco-magnésiens minéraux faisant l'objet du huitième chapitre de cet ouvrage.

La jachère

La mise en jachère périodique a des effets bénéfiques indiscutables sur le calcium et le magnésium échangeables du sol; d'une part, les racines vont chercher en profondeur les éléments minéraux entraînés par les eaux de drainage; d'autre part, le sol, non exploité, reconstitue ses éléments échangeables grâce à la transformation lente des réserves en formes plus assimilables.

Le tableau VII.6 tiré de Jayébo et Moore (1964), concernant les dix centimètres superficiels d'un sol d'Ibadan (Nigéria occidental) montre, après 6 ans de jachère, que le recru forestier est plus efficace que graminées (*Cynodon plectostachus*) et légumineuses (*Pueraria phaseolides*), ces trois objets étant tous nettement supérieurs au sol nu et au mulch d'*Imperata*.

Cette action très favorable de la végétation forestière est d'ailleurs attestée par de très nombreux auteurs (Bartholemew et *al.*, 1953; Nye et Greenland, 1960; Dommergues, 1963; etc.); ce qui ne veut pas dire que l'herbe ait un effet négligeable comme on peut le voir sur le tableau VII.6. Dabin (1964) constate également que quatre années de jachère à *Pennisetum purpureum* entraînent un relèvement de la somme des bases échangeables de 0,63 à 2,5 milliéquivalents pour 100 grammes de terre dans les sols ferrallitiques fortement désaturés de basse Côte d'Ivoire.

TABLEAU VII.6

Comparaison de quelques caractéristiques d'un sol d'Ibadan (Nigéria) après six années sous divers types de jachères, d'après Jayébo et Moore (1964).

Type de jachère	pH	Ca échan- mé/100 g	Mg échan- mé/100 g	Capacité d'échange mé/100 g	Matière organique %
Sol nu	6,8	3,3	0,6	4,6	1,5
<i>Mulch imperata</i>	6,5	2,2	1,2	5,6	2,3
<i>Cynodon plectostachus</i>	7,1	5,0	1,4	6,4	1,8
<i>Pueraria phaseolides</i>	6,4	5,0	1,4	7,2	3,4
Recru forestier	6,6	7,0	1,8	9,3	4,4

Mais on ne saurait trop insister sur la nécessité d'une repousse rapide et vigoureuse de la végétation dans les friches, repousse qui se fait mal dans les terres « dégradées » par un trop long temps de cultures (Morel et Quantin, 1964). D'où alors la nécessité d'installer artificiellement cette jachère. En fait, cette pratique se heurte à des obstacles psychologiques, car le paysan ne voit pas l'intérêt de travailler le sol pour une plante qui ne rapporte rien.

Les engrais verts ont, à ce point de vue, la même efficacité qu'une bonne jachère de même type, avec cette restriction que leur durée (un an généralement, parfois deux) est insuffisante pour promouvoir une amélioration bien sensible des teneurs en cations alcalino-terreux échangeables.

Les plantes d'ombrage

Les cacaoyers de l'état de Bahia au Brésil sont nettement plus productifs (30 %) s'ils se trouvent au voisinage immédiat des pieds d'*Erythrina glauca*, espèce utilisée comme arbre d'ombrage, que ceux situés à huit mètres du tronc; cet accroissement de rendement est attribué, au moins partiellement, à l'enrichissement du sol en divers cations, (et aussi en phosphore) provenant des débris végétaux tombant des Erythrines (Cadima-Zevallos, 1966).

Beaucoup de plantations de caféiers de Côte d'Ivoire, de même que certaines caféières de la région de Carnot dans l'Empire centrafricain, représentent à ce point de vue un optimum; elles sont installées après élimination du sous-bois sans toucher, ou fort peu, à la voûte des grands arbres. Cette pratique culturale, très conservatrice, s'allie malheureusement à une faible productivité à l'hectare.

Il faut également citer le cas des *Acacia albida* de la zone sahélienne d'Afrique occidentale et centrale; on a trouvé au Sénégal qu'à l'aplomb du couvert de cette essence le sol contenait 78 % de plus de magnésium et 100 % de plus de calcium échangeables que quelques mètres plus loin (Charreau et Vidal, 1965). Or l'*Acacia albida* se défolie entièrement en saison pluvieuse et ne gêne, alors, en rien les cultures que l'on peut faire à son pied.

Les paillis et fumiers

Le fumier de ferme, même de qualité médiocre, apporte au sol de nombreux éléments. Si quelques auteurs n'y ont vu qu'une fourniture de nutriments minéraux, la plupart considèrent que l'effet global dépasse très largement ce qu'on pouvait attendre de ceux-ci. Son emploi très restreint, malheureusement, dans la majeure partie des pays situés sous les tropiques ne justifie pas de longs développements.

Signalons toutefois que 60 tonnes par hectare de fumier de ferme ont, dans les sols ferrallitiques sur amphibolite de Madagascar, le même effet sur le pH que 4 tonnes de CaO, (Roche et Velly, 1962).

Les paillis sont d'usage plus courant, mais on tend de plus en plus à en restreindre l'utilisation, en raison de leur coût élevé en main-d'œuvre; outre un bilan hydrique amélioré, le sol profite des éléments minéraux qu'ils contiennent malgré la lixiviation accrue qu'ils induisent en climat humide (Chap. VI § 2-2). La valeur du paillis, à ce point de vue, dépend étroitement des qualités des végétaux épandus: on a vu que l'objet à mulch d'*Imperata* dans l'essai de jachère de Jayébo et Moore (cf. tableau VII.6) était sans intérêt par rapport au sol nu. Ce n'est pas le cas avec d'autres espèces végétales, car, sur des sols fortement désaturés de Madagascar, un bon paillis équivaut, en ce qui concerne le pH, à un épandage de quatre tonnes environ de CaO à l'hectare (Roche et Velly, 1962).

Les résidus de récoltes

Un moyen efficace de diminuer les exportations globales par les récoltes, consiste à restituer au sol tout ce qui n'est pas utilisable par l'homme. Or ces résidus sont parfois considérables, comme dans le cas des céréales dont les pailles contiennent plus de calcium et de magnésium que les grains. Pichot et *al.* (1974) ont mis en évidence, après enfouissement des pailles de mil dans les sols sableux d'origine dunaire du Niger, des teneurs moyennes en calcium et magnésium échangeables (respectivement 1,19 et 0,38 me/100 g) nettement plus élevées que dans le même sol, où les tiges étaient enlevées (Ca échangeable 0,85; Mg éch. 0,17 me/100 g).

Il faut noter que la stabilité de la somme des bases échangeables relatée par Le Buanec au cours de dix ans de culture à Bouaké (Côte d'Ivoire) (1972) provenait en partie de la restitution systématique au sol des résidus de récoltes. Cet auteur préconise, de ce fait, des successions culturales, incluant une forte proportion de graminées qui ont l'avantage de fournir une grande quantité de matière végétale incluant une bonne part des prélèvements minéraux effectués par les plantes. L'efficacité n'est pas absolue puisqu'à Gagnoa (Côte d'Ivoire), il y a eu une baisse notable de la somme des bases échangeables après

six cultures de maïs en trois ans malgré la restitution du paillis au sol. (Cabanettes et Le Buanec, 1974).

Il n'en reste pas moins évident qu'il y a le plus grand intérêt à rendre au sol tout ce qui n'est pas utilisé par l'homme (et les animaux). A titre d'exemple les parches de café contiennent 0,3 % de CaO et 0,15 % de MgO : c'est faible mais équivaut tout de même à un tonnage respectable d'amendement calco-magnésien pour un pays comme la Côte d'Ivoire où 210 000 tonnes de coques sont peu ou mal utilisées (Snoeck, 1974).

Dans le cas de la culture cotonnière, il serait souhaitable d'enfouir les parties aériennes au lieu de les brûler par tas, car elles contiennent, pour une tonne de coton-graine récoltée, 28 kg de CaO et 16 kg de MgO environ (Deat et Sement, 1974). L'arachide possède dans ses fanes les 9/10 du calcium et les 8/10 du magnésium qu'elle a prélevés à partir du sol, etc.

Mais ce dernier exemple souligne aussi la difficulté de ces restitutions, car ces fanes sont consommées par le bétail partout où celui-ci existe; il en est souvent de même pour les tiges de mil et de sorgho. Il est probable que l'intérêt économique de cette nourriture d'appoint est supérieur à celui que pourrait procurer un enfouissement dans le sol. Et cet enfouissement lui-même se heurte au sous-équipement du paysan en moyens de traction et en instruments aratoires.

4. — CONCLUSION

Lorsque l'on recherche les facteurs de l'appauvrissement des sols cultivés en calcium et magnésium, il faut ajouter à la lixiviation sous l'influence du drainage, l'action de l'érosion et des exportations par les récoltes.

On sait actuellement maîtriser, sinon la totalité des phénomènes érosifs, du moins leurs manifestations les plus nocives; malheureusement les techniques à mettre en œuvre exigent, en plus de leur connaissance, une motivation psychologique qui est loin d'être entrée dans les mœurs.

Quant aux exportations par les récoltes, habituellement plus faibles pour le calcium et le magnésium que ce qui est imputable à la lixiviation et à l'érosion, on arrive à les réduire en restituant au sol les parties végétales non utilisées. Mais il faut tenir compte également des impératifs économiques, ici absence de ressources fourragères amenant à faire consommer pailles et fanes par le bétail, ailleurs transport non rentable des résidus des transformations (parches de café par exemple...).

La jachère, qui est le moyen le plus économique de reconstituer des niveaux acceptables du sol en calcium et magnésium échangeables, voit son efficacité de plus en plus réduite par la diminution de sa durée; cette évolution est variable suivant les pays, mais elle paraît inéluctable à moyen terme, parallèlement à une intensification, même modérée, des techniques agricoles.

Or, l'intensification ne peut et ne doit, sauf exception, porter sur un seul ou un petit nombre de facteurs, mais les inclure tous à la fois. L'exemple spectaculaire de la culture de l'arachide au Sénégal montre s'il en était besoin que des nutriments longtemps négligés, comme le calcium et le magnésium, sont aussi nécessaires au sol que l'azote, le phosphore et la potasse.

On s'achemine donc vers une utilisation accrue des amendements calco-magnésiens dont l'emploi fera l'objet du chapitre VIII de cet ouvrage.

CHAPITRE VIII

Les amendements calciques, magnésiens et calco-magnésiens

1. — INTRODUCTION

« Par les présentes, le preneur s'engage, à la requête du bailleur, à épandre tous les trois ans, dans les terres qui lui sont louées, de la marne qu'il prélèvera où bon lui semblera dans le sous-sol... ».

C'était par cette formulation, ou une formulation voisine, que se concrétisait dans les textes, dès la deuxième moitié du 19^e siècle l'obligation faite aux fermiers et métayers d'apporter des amendements calcaires dans les sols désaturés de l'Ouest du bassin parisien. La pratique du chaulage, déjà bien connue des spécialistes, était donc entrée dans les mœurs à cette époque.

Aussi n'est-il pas étonnant que les agronomes constatant la pauvreté en calcium et magnésium des sols tropicaux aient très tôt testé l'efficacité des amendements. Dès 1925, on signale de tels essais sur les terres à arachide du Sénégal, repris à partir de 1934 par Sagot et Bouffil (1945). Dans tous les cas, il n'y a eu aucune amélioration sensible des rendements en arachide; ce que confirment un peu plus tard pour cette plante, et Gillier et Prevot (1960) au Sénégal, et Ashrif (1963) en Gambie. Toujours au Sénégal, Jacquinet (1964) aboutit aux mêmes conclusions pour le sorgho, ainsi que Tourte et *al.* (1964) à propos d'une rotation quadriennale engrais vert — arachides — mil — arachides. Pourtant ces derniers auteurs jettent un cri d'alarme en comparant les pertes en calcium et magnésium (dues à la lixiviation et aux exportations) aux faibles ressources du sol en bases échangeables (S.B.E. égale ou inférieure à 2 mé/100 g) vérifiant ainsi les appréhensions de Fauck (1956) formulées huit ans auparavant dans le sud du pays (Casamance).

Quelques années plus tard l'arachide dépérissait dans certains champs cultivés de longue date à la suite d'une maladie appelée « nanisme jaune » (Blondel, 1970); il fut démontré peu après que ce rachitisme était lié à l'apparition dans ces sols d'aluminium échangeable à doses toxiques (Pieri, 1974), et que la baisse de pH provoquée par l'amenuisement des niveaux de calcium et de magnésium échangeables en était évidemment la cause essentielle.

Actuellement on estime à 430 000 hectares la superficie des terres du Sénégal dangereusement acidifiées, ou sur le point de l'être, et à 27 000 tonnes les amendements calciques et calco-magnésiens qu'il serait nécessaire d'épandre annuellement (Pieri, 1976 a et b).

Si l'on a intentionnellement insisté sur l'exemple des terres à arachides de l'Ouest de l'Afrique, c'est parce qu'il est tout à fait symptomatique de l'évolution qui se produit dans l'agriculture des pays tropicaux :

- dans une première phase, la richesse initiale du sol, ou l'apport par les cendres végétales, laisse croire que le chaulage est une opération sans intérêt:

- puis des agronomes et chimistes du sol font état d'une baisse alarmante du calcium et du magnésium du sol, opinion bientôt justifiée par quelques accidents isolés:

- enfin, on se rend compte de l'ampleur des restitutions calciques et magnésiennes à effectuer, si on veut simplement pouvoir continuer à cultiver.

Cette prise de conscience se fit, semble-t-il, très tôt, vers la fin du 19^e siècle, pour les terres à cannes à sucre des environs immédiats de Salvador (Brésil), ce qui fut sans lendemain; elle survint peu d'années après les essais de mise en valeur quelque peu intensive à Madagascar (Roche et Velly, 1962), dans la vallée du Niari au Congo (Franquin, 1958; Martin G., 1961 et 1967), comme d'ailleurs en culture bananière de Guinée (Champion et *al.*, 1958) ou de Côte d'Ivoire.

Dès avant 1940, il y eut de très bonnes réponses du cocotier aux apports de calcaires sur les alluvions côtières de Malaisie (Coulter, 1972), tandis qu'en Amérique du Sud, en partie sous l'influence d'agronomes américains (du Nord), on s'apercevait de la nécessité de fournir ces amendements à beaucoup de sols. Le Brésil, en particulier, a mis en œuvre au cours des années soixante une véritable « politique » d'amendements calcaires et calco-magnésiens.

On pourrait multiplier ces exemples, tout autant d'ailleurs que ceux où le chaulage n'a eu momentanément aucun effet sur les rendements de culture.

Il importe donc de bien préciser les raisons pour lesquelles il est nécessaire d'apporter des amendements calcaires et magnésiens, de cerner leurs effets favorables et défavorables sur le sol, d'estimer la valeur des divers amendements et de chiffrer les besoins du sol.

On se limitera ici aux apports de sels minéraux les problèmes de maintien et de reconstitution de la fertilité calcique et magnésienne par la jachère, le fumier et le paillis ayant été traités au chapitre précédent (chap. VII.3).

2. — OBJECTIFS, EFFETS FAVORABLES ET DÉFAVORABLES SUR LE SOL DES AMENDEMENTS CALCIQUES ET MAGNÉSIENS

2.1. Teneurs du sol en calcium et magnésium inférieures aux seuils admissibles

Il existe des sols où calcium et magnésium sont à des niveaux trop faibles pour assurer la subsistance des plantes. Le cas est assez rare immédiatement après défrichement, mais se présente avec une fréquence accrue au fur et à mesure que le temps de culture s'allonge.

C'est d'ailleurs surtout le magnésium qui est en cause, puisque l'on a pu déterminer pour cet élément un seuil de carence vers 0,10-0,15 me/100 g et un seuil de déficience vers 0,25-0,35 me/100 g.

Bien que l'on ait parfois noté des carences et déficiences calciques pures, sur canne à sucre et bananier notamment (cf. chap. V), le sol fournit habituellement assez de calcium, même en état de désaturation avancée, pour satisfaire les besoins des plantes, *sensu stricto*, sauf s'il s'agit de légumineuses (1,5 à 2 milliéquivalents pour 100 g de sol sont recommandés pour l'arachide, probablement plus de 3 milliéquivalents pour le soja). Les plantes typiquement acidophiles se contentent de fort peu : par exemple il suffit pour l'hévéa d'apporter du phosphate tricalcique aux doses requises pour une bonne alimentation phosphorique pour obtenir une nutrition calcique suffisante (Coulter, 1972). Pourtant il s'avère parfois nécessaire, après 10 ans de culture en basse Côte d'Ivoire, de fournir de la dolomie à l'ananas, non seulement pour couvrir ses gros besoins en magnésium, élément dont il est friand, mais aussi pour assurer l'immobilisation en calcium, pourtant d'ampleur modeste, qui lui est nécessaire : 170 kg/ha de CaO en moyenne par hectare (Godefroy, Tisseau et Lossois, 1972).

Si des amendements se révèlent indispensables dans tous les cas de déficits absolus en calcium et magnésium du sol, la plupart du temps des effets induits, tout aussi redoutables, apparaissent dans les sols bien avant que carences et déficiences se manifestent.

2.2. Les toxicités aluminiques et manganiques

L'aluminium échangeable (1)

Il apparaît dans les terres acides à doses toxiques, d'ailleurs variables selon les types de sol et le degré de sensibilité des plantes; les accidents, très fréquents et graves à pH inférieurs à 5, s'atténuent très sensiblement, dans l'ensemble, dès que le pH dépasse 5; Forster (1970) fixe à 5,25 le pH à partir duquel les diverses plantes cultivées en Ouganda ne craignent plus l'aluminium et à 5,0 le seuil où se manifeste un impérieux besoin d'amendements calcaires, valeurs que Pieri (1974) chiffre respectivement à 5,5 et 5,0 pour l'arachide poussant dans les sols ferrugineux tropicaux sableux du Sénégal.

Quoiqu'il en soit, il apparaît que, dès que le pH est égal ou, mieux, supérieur à 5,5, il n'y a pratiquement plus à redouter de toxicité aluminique, même pour les plantes qui y sont très sensibles, et ceci dans presque tous les types de sol.

Le calcium est le contrepoison de choix de l'aluminium : en ajoutant 560 kg/ha de calcaire local broyé (266 kg/ha de CaO) à des sols de Sierra Leone, Brams (1971) fit passer en 5 mois l'aluminium échangeable de 30 % à 9 % de la capacité d'échange, tandis que le pH remontait de 4,5 à 5,1; des résultats analogues furent obtenus à Madagascar par Celton, Roche et Velly (1973) et Velly (1974), etc.

La toxicité manganique

Le manganèse se trouve présent surtout sous forme tétravalente, peu soluble, dans les sols neutres ou faiblement acides, mais dès que le pH baisse on assiste

(1) Il n'est donné ici qu'un court résumé des incidences de l'aluminium échangeable sur les plantes cultivées; le lecteur désireux d'approfondir ce sujet pourra consulter, en langue française Segalen (1973), Boyer (1976), en langue anglaise Kamprath (1972); l'abondante bibliographie citée par ces auteurs lui permettra, en outre, de se référer aux documents originaux.

à une transformation en manganèse divalent, hautement assimilable, qui peut devenir toxique (1) s'il est abondant.

Cette toxicité du manganèse est bien évidemment fonction de la teneur du sol (et dans la plupart des cas de la roche-mère) en cet élément, mais elle n'apparaît guère que pour des pH de 5,5 ou inférieurs à cette valeur. Elle se manifeste parfois pour une réaction faiblement acide (à $\text{pH} \leq 6,5$ comme en Ouganda selon Chenery, 1954); dans ce cas il s'agit habituellement de sols compacts drainant mal où l'engorgement hydrique favorise la réduction en composés du type MnO hautement assimilables (Foy, 1974).

On peut noter qu'en sol sain un pH égal ou supérieur à 5,5 se révèle propre à éviter les intoxications par le manganèse tout autant que celles dues à l'aluminium; ces deux toxicités apparaissent d'ailleurs simultanément dans beaucoup de cas (Foy, *op. cit.*).

2.3. Assimilabilité du phosphore du sol

Ce problème ayant déjà fait l'objet précédemment de développements (chap. III § 6) il est simplement rappelé ici qu'une bonne saturation calcique du sol favorise l'apparition de formes phosphatées incluant du calcium à bonne assimilabilité, tandis qu'à bas pH la tendance est à la prédominance de phosphore lié au fer moins facilement utilisable par les plantes. Tous les essais de chaulage en sol acide ont d'ailleurs mis en évidence une meilleure utilisation du phosphore du sol et des engrais phosphatés.

2.4. Fourniture d'azote aux cultures

On a vu précédemment (chap. III) que si les bactéries ammonifiantes étaient relativement peu sensibles à la réaction du sol (encore qu'elles soient quasi-inhibées à $\text{pH} 4$ et que leur activité croisse assez régulièrement jusque vers $\text{pH} 6$), les bactéries nitrifiantes le sont beaucoup plus; aussi la nitrification très faible à $\text{pH} \leq 5$, croît lentement jusque vers $\text{pH} 6,5$ et est maximum entre $\text{pH} 6,5$ et $7,5$.

En relevant le pH et en accroissant la teneur en bases du sol, les amendements calco-magnésiens auront pour effet d'accroître sensiblement la fourniture de nitrates aux plantes. On favorisera, en outre, la pullulation des micro-organismes fixateurs d'azote (Dommergues, 1956; Bachelier, 1963; Malavolta, 1967; Denarie, 1967 et 1968; entre autres...). Les rhizobiums en particulier sont extrêmement sensibles à l'aluminium échangeable (donc à l'acidité du sol) et l'effet bénéfique du calcium n'est plus à démontrer pour leur survie et leur métabolisme (Anderson et *al.*, 1956; Rassel, 1957; Stephens, 1967 c; Pieri, 1974; etc.).

(1) On a mis en évidence des toxicités manganiques en Ouganda sur diverses cultures (Chenery, 1954), au Congo sur arachide et cotonnier (Franquin, 1958), au Tchad et en Côte d'Ivoire sur cotonnier (Megie, 1960; Bouchy, 1970), à Madagascar sur un certain nombre de plantes (Ngo Chang Bang, Oliver et Falais, 1971; Celton, Roche et Velly, 1973), en Malaisie sur cacaoyer (Shorrocks, 1964), à Puerto Rico sur tabac (Abruna-Rodriguez et Vicente-Chandler, 1970), au Brésil sur caféier (Malavolta, 1967); on les suspecte en Tanzanie sur sisal (Mandra, 1973) et en Malaisie sur hévéa (Coulter, 1972), etc. Une telle énumération ne peut, évidemment, être exhaustive mais elle donne une idée de la fréquence de ces accidents.

2.5. La structure du sol

Le fer joue un rôle essentiel dans les propriétés structurales des sols à kaolinite où il assure en grande partie la neutralisation des charges électro-négatives de ce colloïde argileux. Aussi-a-t-on craint que sa substitution par le calcium des amendements, ne nuise à la structure de ces sols (Nye, 1963). Il semble bien que cette crainte se soit révélée sans fondement lors des innombrables essais de chaulage réalisés un peu partout dans le monde. En effet le calcium, selon toute évidence, influe fort peu sur les caractères de structure de ces sols et peut être, même, agit-il dans le sens de leur amélioration.

Par contre, dans les sols à illite et montmorillonite son rôle est essentiel pour la formation et la cohésion des agrégats au contraire du magnésium qui tend à « dégrader » les caractéristiques structurales (cf. chap. III).

2.6. La matière organique

On a vu que les amendements calcaires et calco-magnésiens favorisent la fourniture de nitrates aux plantes; mais cet apport supplémentaire s'accompagne évidemment d'une minéralisation accrue de l'humus.

Le souvenir des expériences désastreuses en Europe occidentale (menées, il est vrai, surtout sur des sols podzoliques et avec de très fortes quantités de chaux) fit craindre longtemps que l'action de ces amendements, augmentée par la chaleur et l'humidité des tropiques, ne conduise à des catastrophes pour le stock organique du sol. Il apparaît que ce danger fut largement surestimé. Il est notoire en effet que dans presque tous les essais de chaulage, les auteurs parlent assez rarement du devenir de l'humus après cette opération, ce qui conduit à penser que sa diminution en quantité ne les a préoccupés que fort modérément.

Pour s'en tenir à l'Afrique francophone Champion et *al.* (1958) ont bien remarqué que l'apport annuel de 5 tonnes/ha de calcaire dans les bananeraies de Guinée correspondait à une combustion plus forte de la matière organique du sol, mais ils n'ont pu l'évaluer, les traitements culturaux masquant cette évolution. Les tourbières de l'Agneby en Côte d'Ivoire reçoivent des chaulages massifs lors de leur transformation en plantations de bananiers; on y constate bien une minéralisation accélérée de la tourbe, mais on ne sait trop ce qu'il faut le plus incriminer, l'amendement ou le drainage. Lorsqu'il s'agit des sols sableux et sablo-argileux cultivés, et donc déjà fortement appauvris en matière organique, du centre et du sud du Sénégal, on n'a guère remarqué de diminution notable du maigre stock d'humus après chaulage (Fauck com. pers.; Poulain, com. pers.). Quant au sol argileux (ferrallitique fortement désaturé) de la vallée du Niari au Congo, les teneurs en carbone sont de 2,95 % pour le témoin non chaulé et oscillent aléatoirement entre 2,8 et 2,5 % lorsqu'on y répand du calcaire broyé à des doses allant de 1 tonnes/hectare à 24 tonnes/hectare (Martin G., 1967).

Il paraît donc relativement aisé de conclure que, si les amendements calcaires et calco-magnésiens favorisent la minéralisation de la matière organique, cette transformation ne revêt qu'une ampleur modérée aux doses habituellement utilisées, le plus souvent quelques tonnes à l'hectare de CaO et MgO, quand il ne s'agit pas de quantités inférieures à la tonne.

2.7. Assimilabilité des oligo-éléments

Si le relèvement du pH consécutif à l'apport d'amendements favorise l'assimilabilité du *molybdène*, elle diminue par contre celle des autres oligo-éléments.

Aussi, après de forts apports de calcaire broyé ou de chaux agricole, il peut apparaître des déficiences et carences en zinc sur bananier en Guinée (Moity, 1954), sur maïs dans le Sud du Brésil (Malavolta, 1967), sur cacaoyer au Ghana (expérience en pots selon Cunningham, 1964) et également en cuivre sur bananier en Côte d'Ivoire (Dabin et Leneuf, 1960; Moity, 1961; Lassoudiere, 1973).

Les sols des régions intertropicales sont habituellement assez bien pourvues en fer pour qu'il n'y ait aucune chlorose ferrique, sauf présence permanente de carbonates libres dans les sols à pH supérieurs à 7, ce qui ne se produit pas, même avec des apports massifs de calcaire.

Quant au bore du sol, le relèvement du pH par chaulage diminue sa solubilité à l'eau (Bishop et Cook, 1958); mais comme, d'autre part, ses réserves se trouvent pratiquement toutes sous forme de complexes organiques, la minéralisation de l'humus, après amendements, en libère une certaine quantité (Olson et Berger, 1946); d'où des effets contradictoires, mais souvent favorables en définitive, tout au moins sur blé à Madagascar (Oliver et al., 1974), ce qui confirme des expériences menées aux Etats-Unis (Hatcher, Bower et Clark, 1967).

On a vu un peu plus haut que l'apport de chaux (ou de calcaire ou de dolomie) faisait disparaître les toxicités manganiques par l'insolubilisation du manganèse: ce phénomène peut avoir pour conséquence, dans les sols mal pourvus en cet élément, d'induire des déficiences en manganèse (assez rares en fait) chez les plantes cultivées.

En tout cas, il semble prudent d'apporter au sol une petite quantité d'oligo-éléments divers lors des chaulages, comme on le recommande au Brésil (Mikkelsen, Freitas et McClung, 1961).

2.8. Le potassium du sol et des engrais

On a remarqué, tant dans le sud des Etats-Unis qu'à Puerto Rico et au Brésil méridional, que les amendements calcaires réduisaient l'assimilabilité du potassium présent dans le sol au point d'induire des carences sur les cultures (Adams et Pearson, 1967; Goedert et al., 1975). D'expérimentations complexes menées à l'aide de la méthode quantité-intensité de Beckett (1964), on peut déduire schématiquement que le calcium fourni au sol en modifie profondément les caractéristiques chimiques (suppression de l'aluminium échangeable, fixation de Ca et Mg, augmentation de la capacité d'échange « *in situ* » due à l'apparition de charges négatives, etc.), ce qui a pour effet dans ces sols fort mal pourvus en tout sauf en potassium de rendre cet élément déficitaire par rapport aux autres alors qu'il était au départ largement excédentaire (Goedert et al., *op. cit.*).

C'est un fait que tout apport calcique, non seulement réduit la solubilité du potassium du sol (et donc sa lixiviation), mais favorise considérablement la fixation de celui qui peut être amené par les engrais, comme cela fut noté dans les bananeraies de Guinée et de Côte d'Ivoire (Champion et al., 1958; Godefroy, Poignant et Marchal, 1971). Comme il n'est guère concevable que l'opération fort coûteuse du chaulage ne s'accompagne pas également d'une fumure NPK classique, ce phénomène de réduction de la solubilité du potassium est, en définitive, plus un avantage qu'un inconvénient.

2.9. Le magnésium

Comme cela se passe pour le potassium, le calcium d'un amendement purement calcique diminue la lixiviation du magnésium du sol (cf. chap. VI § 1-2).

3. — FORMES DES AMENDEMENTS CALCIQUES ET MAGNÉSIENS

3.1. Les amendements purements magnésiens

Le sulfate de magnésie (SO_4Mg à 33 % de MgO), la *kiéserite* ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) et le *patent-kali* ($\text{SO}_4\text{K}_2\text{SO}_4\text{Mg}$ à 8 % de MgO en moyenne) sont les plus employés; quant au *patent-kali* son utilisation est plus due à sa valeur comme engrais potassique (28 % de K_2O) que pour le magnésium qu'il apporte (9 % de MgO). Autre engrais magnésien, mais assez peu courant : le sel d'Epsom ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Comme ces formes de magnésium sont relativement chères, on a essayé d'ajouter au sol des roches magnésiennes broyées, *serpentine* [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_{11}(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$] et *olivine* (SiO_4) (FeMg)₂, qui ont l'avantage d'un bas prix de revient, à condition de se trouver à proximité des gisements. Mais, comparant l'effet de la serpentine, de la kiéserite et du sel d'Epsom à celui de la dolomie sur le *Pueraria phaseolides* utilisé comme plante de couverture, Shorrocks (1965 a) a montré que la réponse à la serpentine était faible, tandis que kiéserite, sel d'Epsom et dolomie se sont montrés à peu près équivalents; toutefois, si l'on recherche un effet immédiat, les deux premiers ont une action plus rapide surtout à petites doses, tandis qu'à la longue la dolomie prouve une efficacité un peu supérieure, ce que Shorrocks (*op. cit.*) attribue à la présence du calcium en plus de celle du magnésium.

En raison du prix de revient assez élevé à l'importation et de la concentration en magnésie relativement faible (25 à 28 % de MgO pour la kiéserite, si elle est à peu près pure), l'emploi d'amendements purement magnésiens n'est intéressant que lorsqu'il s'agit de corriger une déficience purement magnésienne. Il existe effectivement de cas où il est inutile d'apporter simultanément du calcium comme par exemple sur ananas ou palmier à huile, soit parce que le sol en contient assez, soit parce que cet élément est déjà amené en quantité suffisante par les phosphates tricalciques comme sur les palmiers à huile et hévéas de Malaisie (Coulter, 1972). Si l'on cherche à relever en même temps le pH, il faut employer calcaires et dolomies.

3.2. Le gypse

Le gypse ($\text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$) a le grave inconvénient de ne pas être un sel neutre; légèrement acide il provoque des baisses de pH, s'il est mis à fortes doses.

Aussi son emploi se limite-t-il surtout aux sols alcalins afin d'éliminer le sodium fixé sur le complexe absorbant en le remplaçant par du calcium. On l'a utilisé parfois à petites doses, quelques dizaines de kilogrammes à l'hectare, pour le soufre qu'il apporte au sol. Son effet acidifiant est alors négligeable.

Du fait de la solubilité du gypse, son calcium est nettement plus sensible à la lixiviation que celui du calcaire ou de la chaux (Godefroy, Poignant et Marchal, 1971).

3.3. Les composés phosphatés du calcium

Le phosphate naturel ou phosphate tricalcique

Le phosphate naturel outre ce qu'il contient de phosphore (de 25 % de P_2O_5 pour les phosphates du Maroc à 37 % de P_2O_5 pour les phosphates du

Sénégal, du Togo et de Christmass) possède une quantité appréciable de calcium, théoriquement 56 % si la pureté était absolue, en fait de l'ordre de 40 à 52 % de CaO suivant l'origine, teneur à laquelle s'ajoute assez souvent un faible pourcentage de magnésie (0 à 5 %, en général moins de 1 %).

Aussi a-t-on pensé à utiliser le phosphate tricalcique, non pour relever le pH puisqu'il s'agit d'un sel neutre, mais pour éviter sa baisse sous culture en constituant un volant de calcium. Effectivement, Coulter (1972) signale qu'on arrive à empêcher par ce moyen une acidification des sols de Malaisie préjudiciable aux cultures qui reçoivent du sulfate d'ammoniaque. Poulain (1967) a tenté d'évaluer au Sénégal la quantité de phosphate tricalcique local (phosphate de Taïba à 50 % de CaO) qu'il fallait fournir aux sols ferrugineux tropicaux sableux, dits sols Dior, du centre du Sénégal pour éviter une baisse de pH au cours de la rotation quadriennale, engrais vert-arachide-mil-arachide, fumée par 60 kg/ha d'azote sous forme de sulfate d'ammoniaque et 120 kg/ha de K_2O (KCl); il en arrive à la conclusion qu'il faut à peu près une tonne de phosphate tricalcique pour stabiliser la réaction du sol (tableau VIII.1) quelle que soit d'ailleurs la finesse du produit épandu.

TABLEAU VIII.1

Effet du phosphate tricalcique sur le pH d'un sol Dior au cours d'une rotation quadriennale dans le centre du Sénégal (sol Dior) D'après Poulain (1967)

Année \ pH	Témoin	Phosphate de Taïba brut		Phosphate de Taïba moulu fin
		0,5 t/ha	1 t/ha	0,5 t/ha
1962	5,3	5,3	5,3	5,3
1966	5,0	5,1	5,3	5,1

Or le phosphate tricalcique, même produit sur place comme au Sénégal, est cher : Charreau et Fauck (1969) n'osent guère recommander que 500 à 700 kg / ha de phosphate tricalcique en Casamance en fumure de fond surtout destinée à assurer les besoins en phosphore; ils conseillent de remédier à la baisse prévisible du pH par calcaire, dolomie ou chaux.

Les quantités de phosphate tricalcique pourtant faibles (400 à 500 kg/ha tous les 4 ans), officiellement préconisées au Sénégal, étaient déjà à cette époque (décade 1964-1973) très coûteuses pour le paysan; et la récente évolution des prix a certainement aggravé cette situation. Quelle qu'en soit l'utilité par ailleurs, un tel apport eut été incapable de stabiliser le pH dans ces sols (Pieri, 1976 b) en raison des trop faibles quantités qu'il est économiquement possible d'apporter.

Les scories de déphosphoration ou scories Thomas

Résidus du traitement de l'acier, les scories de déphosphoration sont largement utilisées en agriculture tant pour leur apport en phosphore (16 à 20 % de P_2O_5) que pour la neutralisation des sols acides : elles contiennent en effet 45 à 55 % de CaO et 2 à 5 % de MgO. Elles ont en plus l'avantage d'apporter de nombreux oligo-éléments, manganèse (3 à 7 % de MnO), vanadium, cobalt, chrome, etc.

Leur emploi est surtout répandu dans les pays qui ont une importante industrie sidérurgique (Europe occidentale, Etats-Unis, Japon, etc.). Ailleurs, leur transport est obéré par une certaine proportion de composés sans intérêt pour l'agriculture (15 à 20 % de Fe_2O_3 , 1 à 6 % de SiO_2). Pourtant on en signale parfois l'usage dans les bananeraies, en Côte d'Ivoire par exemple.

Les schlams phosphatés

On désigne sous ce nom les résidus de l'industrie des phosphates. On a utilisé au Sénégal des schlams à 35 % de CaO.

Le phosphate magnésien calciné

On a essayé, en Allemagne en particulier, de combiner phosphate tricalcique et kiéserite.

L'industrie japonaise offre actuellement sur le marché un mélange intime de phosphate et de serpentine calcinés ensemble qui titre 20 % de P_2O_5 , 15 % de MgO, 20 % de SiO_2 . Leur utilisation est surtout répandue en Extrême-Orient (Japon, Corée, Chine populaire).

3.4. Calcaire (CO_3Ca) et dolomie (CO_3Ca , CO_3Mg)

Les carbonates naturels

Absolument purs, le calcaire contient 56 % de CaO et la dolomie 30 % de CaO et 20 % de MgO.

En fait, ces carbonates sont tirés de gisements naturels dont la pureté n'est pas absolue : un calcaire à 80-95 % de carbonate de calcium, — soit 45 à 53 % de CaO —, est considéré comme pur, de même qu'une dolomie à 28 % de CaO et 18 % de MgO. (Il existe bien sûr des produits de pureté supérieure). A vrai dire, des calcaires impurs, comme des marnes, sont parfaitement utilisables s'ils sont extraits sur place, à condition de corriger par un apport supplémentaire de produit brut, le déficit pondéral en CaO (et en MgO) dû aux impuretés.

S'il y a transport sur moyenne ou longue distance (camion, chemin de fer ou bateau), il est évident qu'on a intérêt à ne faire voyager que des produits à forte concentration en CaO et MgO pour ne pas grever inutilement le prix de revient.

On sait que beaucoup de calcaires sont dolomités à divers degrés (chap. I § 1-1); leur emploi est courant au Brésil où ils ont l'avantage d'apporter un peu plus de calcium que de magnésium, ce qui permet d'obtenir des rapports Ca/Mg supérieurs à 1. On a utilisé au Niari (Congo) des calcaires locaux, l'un à 85 % de CaO et 8 % de MgO, l'autre dolomitique à 52 % de CO_3Ca et 25 % de CO_3Mg qui ont donné satisfaction (Martin G., 1961 et 1967), etc.

Formes d'utilisation du calcaire et de la dolomie.

— produits dits crus : les carbonates

Il s'agit des calcaires et dolomies broyés en poudre de finesse variable, définis suivant les normes françaises NFU 440 par 6 types tenant compte du numéro des tamis à travers lesquels ils passent.

Type A : (tamis module 20), ouverture des mailles 0,08 mm

Type B : (tamis module 23), ouverture des mailles 0,16 mm

Type C : (tamis module 26), ouverture des mailles 0,315 mm
 Type D : (tamis module 31), ouverture des mailles 1,00 mm
 Type E : (tamis module 38), ouverture des mailles 5,00 mm
 Type F : (tamis module plus grossier que le précédent)
 Les types A,B,C,D, sont dits à action rapide.

– *produits dits cuits : chaux calcique et chaux magnésienne*

On obtient, par cuisson des carbonates et disparition consécutive de gaz carbonique, des chaux vives : chaux calcique provenant du calcaire, chaux magnésienne provenant de la dolomie et du calcaire dolomitisé. Leur dosage peut varier de 80 à 95 % de CaO pour les chaux calciques; quant aux chaux magnésiennes, elles doivent contenir au moins 10 % de MgO pour avoir droit à cette appellation; une teneur courante est de 50 % de CaO et 35 % de MgO.

En fait, ces chaux vives sont, de par leur hygroscopicité et leur alcalinité, difficiles à manipuler et à transporter (sauf en récipients étanches). En outre, on craint une action brutale sur le sol.

Aussi préfère-t-on généralement employer des chaux éteintes à l'eau : ce sont des poudres qui dosent entre 50 et 75 % de CaO pour la chaux calcique (65 % est une teneur assez habituelle) et environ 30 à 40 % de CaO et 20 à 25 % de MgO en moyenne pour la chaux magnésienne (bien que des taux de magnésium inférieurs à celui-ci soient acceptables, jusqu'à 7 % de MgO environ).

Efficacité comparée des chaux et des carbonates

Tout d'abord les chaux vives sont délicates à manipuler du fait de leur causticité. On les utilise parfois de préférence en pays tempérés lorsque l'on veut en même temps réduire certaines formes de parasitisme (Strongles par exemple). Mais bien souvent, pour des raisons pratiques, on préfère les chaux éteintes.

On s'accorde assez généralement à reconnaître que les chaux ont une action plus rapide sur le sol que les calcaires et dolomies broyés, mais qu'elles sont plus sensibles à la lixiviation. En fait, on a montré dans la vallée du Niari (Congo) que l'efficacité de ces deux formes était la même pour un tonnage identique de CaO et MgO (Martin G., 1967).

Tout se résume donc à une question de prix de revient : lorsqu'il y a extraction sur place, les carbonates sont meilleur marché, mais, si on doit les importer, les chaux arrivent souvent à un prix inférieur en raison de leur concentration qui permet de diminuer le coût du transport.

Dans les climats très humides, on préférera les carbonates moulus grossièrement afin de ralentir leur solubilisation dans le sol, encore que l'on manque d'expérimentations systématiques permettant de définir la granulométrie optimale.

Utilisation du calcaire et de la dolomie et des chaux correspondantes

Il est un fait que beaucoup d'agronomes, en constatant la baisse du pH dans les sols cultivés, pensent immédiatement au calcium, sans trop se préoccuper du magnésium.

Faut-il utiliser des amendements purement calciques ou de la dolomie qui apporte en même temps calcium et magnésium ?

La réponse relève du bon sens.

Pour des plantes qui ont des très gros besoins en magnésium, comme le bananier, la dolomie (ou la chaux magnésienne) est tout indiquée. Il en est

de même pour l'ananas qui craint un excès de calcium dans le sol. Dans cette optique, il est symptomatique que Bouchy (1972), mis en présence d'une forte baisse du stock magnésien (et aussi calcique) du sol de Bouaké, préconise un apport de dolomie.

Dans le cas des légumineuses (arachide, soja) très friandes de calcium, il est préférable d'apporter des amendements surtout calciques; un calcaire (ou une chaux), faiblement magnésien pour éviter une éventuelle déficience en magnésium, est alors recommandé.

D'une façon générale, les amendements doivent assurer au sol un équilibre Ca-Mg, dont on sait (Chap. IV.3) qu'il ne doit pas être inférieur à 1 et qu'il est souvent optimum entre 2 et 10, sauf exceptions dont la plus notable est celle des plantes acidophiles (Hévéa, théier, palmier à huile, ananas, etc.).

4. — CALCUL DES DOSES D'AMENDEMENTS CALCIQUES ET CALCO-MAGNÉSIENS

On retiendra surtout ici le cas des amendements calciques et calco-magnésiens. En effet, les produits purement magnésiens, ou bien sont utilisés pour corriger une déficience ou une carence du sol en magnésium, et le calcul des quantités à épandre n'est pas différent alors de celui d'un engrais potassique par exemple, ou bien on les emploie comme complément d'un apport purement calcique (afin de ne pas déséquilibrer le rapport Ca/Mg) et ils rentrent dans le cas général, seul entrant en ligne de compte leur teneur en magnésie (MgO).

4.1. Calcul basé sur la correction du pH du sol

Soit un sol acide dont on se propose d'amener le pH à une valeur donnée (souvent entre 5 et 6). La méthode la plus utilisée, actuellement recommandée par la F.A.O., est celle de Hissink: on met dans une série de flacons la même quantité de terre (10 g à 50 g) à laquelle on ajoute des doses croissantes d'une solution titrée d'hydrate de calcium Ca (OH)₂; on agite, on laisse reposer plusieurs heures et on mesure le pH du liquide surnageant. On trace alors la courbe du pH en fonction de la quantité de CaO; cette courbe permet de déterminer exactement quelle quantité de CaO (ou CaO + MgO) il faut ajouter au sol pour obtenir le pH désiré.

Ce faisant, on devrait tenir compte des deux facteurs de correction. Tout d'abord, les variations saisonnières du pH peuvent entraîner une erreur dans cette estimation (Collins, Whiside et Cress, 1970); effectivement, le pH peut varier de 1 unité entre saison sèche (pH maximum) et fin de la période des pluies (pH minimum) en particulier dans les sols argileux cultivés du Niari au Congo (Martin G., 1958), alors que cette variabilité n'est pas mesurable dans les sols sableux du Sénégal (Bouyer, 1959). En pratique, on se préoccupe rarement de ces variations saisonnières du pH, peut-être à tort.

Plus importante est la correction qui concerne la lixiviation des amendements apportés: on recherche en effet un résultat non pas instantané mais étalé dans le temps, et l'enlèvement par drainage du calcium et du magnésium des amendements joue en sens inverse de l'apport. On a calculé dans la vallée du Niari que pour obtenir au bout d'un an pH 7, il fallait 3 fois la dose prévue par la méthode de Hissink, coefficient qui tombe à 1,5 si on se contente de pH 5, (Martin G., 1961). Tous les sols n'ont pas une telle

susceptibilité à la lixiviation, mais c'est un facteur à prendre très sérieusement en considération et on ne saurait trop recommander, à défaut d'expérimentations locales précises, de « forcer » un peu sur les doses indiquées par cette méthode.

4.2. Calcul basé sur l'acidité d'échange

Dans les latosols du Sud du Brésil (État du Parana), on emploie une tonne à l'hectare de dolomie (29,2 % de CaO, 21,4 % de MgO) par degré d'acidité mesuré à KCl normal (Munzilli, Kalckmann et Munhoz, 1969).

Le même procédé est utilisé au Pérou sur des ultisols (Villachia, Bormenisza et Arca, 1974) pour déterminer la dose de calcaire à épandre.

4.3. Calcul basé sur le pH « tamponné » du sol (Buffer pH)

L'idéal serait de pouvoir déterminer grâce à des tables de conversion la quantité de carbonates ou de chaux agricole à partir d'une mesure simple de laboratoire, comme le pH.

TABLEAU VIII.2

Besoins en calcaire pour relever le pH du sol en utilisant une solution tampon, d'après Shoemaker, Mc Lean et Pratt (1961).

pH tamponnée du sol	CO ₃ Ca pur en t/ha		
	pH 6,8 H ₂ O	pH 6,4 H ₂ O	pH 6,0 H ₂ O
6,7	3,1	2,7	2,2
6,6	4,2	3,8	3,1
6,5	5,6	4,9	4,0
6,4	7,4	6,0	5,1
6,3	8,2	7,1	6,0
6,2	9,4	8,3	6,9
6,1	10,7	9,4	7,8
6,0	12,0	10,5	8,7
5,9	13,4	11,6	9,8
5,8	14,5	12,7	10,7
5,7	15,9	13,8	11,6
5,6	17,2	15,0	12,5
5,5	18,5	16,1	13,4
5,4	19,9	17,2	14,5
5,3	21,0	18,3	15,4
5,2	22,4	19,2	16,5
5,1	23,7	20,3	17,4
5,0	25,1	21,5	18,3
4,9	26,4	22,6	19,2
4,8	27,7	23,7	20,3

En fait, l'aluminium échangeable, qui apparaît à bas pH en quantités très variables suivant les types des sols, en interdit l'usage en raison du tampon acide qu'il forme tant qu'il n'est pas complètement éliminé.

Aussi des agronomes des Etats-Unis ont-ils mis au point une méthode dite du pH tamponné (Buffer pH). Bien que de nombreux auteurs l'aient préconisée (Brown, Woodruff, Mehlich, etc.) en diverses variantes, nous retiendrons celle des Shoemaker, Mc Lean et Pratt (1961) qui a l'avantage d'être valable même s'il y a encore dans le sol des reliquats d'un précédent chaulage. Le tampon est constitué ainsi :

— paranitrophénol	1,8 g
— triéthanolamine	2,5 g
— chromate de potassium (K_2CrO_4)	3,0 g
— acétate de calcium $Ca(CO_3, CH_3)_2$	2,0 g
— chlorure de calcium $CaCl_2, 2H_2O$	53,1 g
— soude Na OH q. s. pour ajuster pH 7,5	7,5 g

Une première mesure de pH à l'eau distillée (5 g de sol, 5 ml d'eau) permet d'éliminer les sols qui n'ont pas besoin ou peu besoin d'amendement ($pH_{H_2O} \geq 6,0$). Quant aux autres, on ajoute alors 10 ml de tampon et on lit le pH à l'électrode de verre. Une table de conversion (tableau VIII.2) permet de déterminer les besoins en chaux pour arriver au pH désiré.

Des tests similaires, avec des tampons différents, furent proposés pour les sols à faible acidité d'échange (Adams et Evans, 1962) ou encore pour les sols sableux de Floride (Yuan, 1974).

L'inconvénient de ces méthodes paraît résider dans le fait que les tables de conversion sont établies pour les sols des Etats-Unis et parfois même pour certains d'entre eux. Leur transposition en milieu tropical exigerait vraisemblablement un étalonnage préliminaire.

4.4. Calcul basé sur les teneurs en aluminium échangeable

L'un des buts essentiels de l'apport d'amendements calcaires et calco-magnésiens est de corriger les toxicités aluminiques qui apparaissent à bas pH.

Coleman et *al.* (1958) conseillent de calculer les quantités de CaO (et MgO) à apporter en fonction des teneurs en aluminium échangeable du sol milliéquivalent pour milliéquivalent.

Cette simple neutralisation de l'aluminium ne fait pas, ou fort peu, augmenter le pH; il apparaît, sur le complexe absorbant, des charges négatives qu'il vaut mieux compenser. Aussi Kamprath (1970) recommande-t-il d'utiliser un coefficient multiplicateur de 1,5 dans les sols contenant 2 à 7 % de matière organique (où ce phénomène est particulièrement sensible) pour éliminer 85 à 90 % de l'aluminium échangeable.

Au Brésil on module empiriquement ce coefficient de la façon suivante (Coelho et Verlengia) :

— Sol avec moins de 1,5 % de matière organique	coefficient 1
— Sol ayant entre 1,5 et 3 % de matière organique	coefficient 1,5
— Sol ayant plus de 3 % de matière organique	coefficient 2

Lorsque l'on connaît bien « ses » sols, la simple considération du pH peut suffire : ainsi Reeve et Sumner (1970) corrigent-ils les toxicités aluminiques des oxisols du Natal en leur apportant un sixième de la dose d'amendements calcaires nécessaires pour élever le pH à 6,5.

Quoiqu'il en soit la simple neutralisation de l'aluminium échangeable ne fait pas, ou très peu, remonter le pH qui reste le plus souvent compris entre

4,5 et 5,0 (d'où en particulier des risques de toxicité manganique si celle-ci existe). Dès que l'élimination de Al^{+++} est complète, le pH augmente rapidement avec quelques apports supplémentaires de carbonates ou de chaux.

4.5. Quelle méthode choisir ?

Tout dépend évidemment du but que l'on se propose d'atteindre.

Si pour des motifs économiques, on ne veut que neutraliser l'aluminium échangeable, on choisira la méthode préconisée par Coleman et *al.*, Kamprath et autres auteurs.

Par contre si l'on désire arriver à un pH donné, il faudra appliquer la technique de Hissink ou celle du pH tamponné (en supposant qu'elle ait déjà fait l'objet d'adaptation aux sols considérés).

5. — FIXATION DIFFICILE DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM DES AMENDEMENTS SUR LE COMPLEXE ABSORBANT

On ne saurait trop insister sur le fait qu'une fumure NPK est destinée en priorité à assurer les besoins des plantes, tandis qu'on « chaulé » un sol pour améliorer ou conserver ses caractéristiques physico-chimiques par une fixation de calcium et magnésium sur le complexe absorbant.

Aussi curieux que cela puisse paraître après plusieurs siècles de pratique du chaulage, on connaît mal les effets exacts sur le sol d'un amendement calcaire (ou calco-magnésien).

Déjà entre les deux guerres mondiales, Mc Intire, Shaw et Robinson (1934) constatent que du magnésium ajouté dans des lysimètres sous forme d'oxydes et de carbonates se transformait difficilement, au bout de 4 ans, en magnésium échangeable, ce que confirment plus près de nous Jacob (1958) en Allemagne et Mokwunye et Melsted (1973) à la fois pour des sols des Etats-Unis et de Sierra Leone; et pourtant dans ce dernier cas, le magnésium était sous une forme en principe fort soluble ($MgCl_2$).

Quant au calcium des amendements, s'il augmente bien le Ca du complexe absorbant, il enrichit encore plus la solution du sol (Helyar et Anderson, 1974). Très curieusement, les sites d'échange ne paraissent fixer le calcium que s'ils sont en contact intime avec l'amendement; quant à celui qui est présent dans les solutions et donc susceptible d'être entraîné par drainage, il semble « inerte », pratiquement sans effet neutralisant sur le sous-sol qu'il traverse.

Un tel phénomène, attesté par Martin G. (1961) au Congo, est bien connu des agronomes américains (du Nord et du Sud) sous le nom évocateur de « barrière chimique »; ce qui, en clair, signifie qu'au dessous de l'horizon travaillé au cours de l'enfouissement des amendements, ceux-ci sont sans action ou presque, et cela d'autant plus que le sol est plus acide (Uehara et Keng, 1975). Aussi dans certains sols très chargés en aluminium échangeable, les racines des plantes cultivées doivent-elles se cantonner dans la tranche de sol amendée. Faute de mieux, on conseille au Brésil d'enfouir d'abord la moitié de la dose par un labour profond à 30 cm et l'autre moitié par un labour superficiel à 15 cm (Soares et *al.*, 1975; Gonzalez et *al.*, 1976).

Cette barrière chimique peut expliquer, au moins partiellement, l'intensité de la lixiviation des amendements. Mais jusqu'à présent, on ne sait pas briser facilement la « barrière chimique ». C'est un très grave handicap pour la rentabilité de l'opération très coûteuse que représente la fourniture au sol de quantités importantes, — et pourtant nécessaires —, de calcium (et aussi de magnésium).

Aussi serait-il éminemment souhaitable, comme le préconisent Roose et Talineau (1973) que la prochaine étape des recherches agronomiques en ce domaine porte sur les modalités de la fixation des amendements calciques et magnésiens dans le sol, sur leur meilleure utilisation par les plantes et sur les moyens de diminuer leur lixiviation, perte sèche pour l'agriculture

6. — CONCLUSION : LA PRATIQUE DU CHAULAGE

6.1. Objectifs recherchés

Ils sont de plusieurs ordres :

— Corriger les carences et déficiences magnésiennes et calciques du sol; le magnésium est ici beaucoup plus souvent concerné que le calcium. Les doses à épandre seront en général faibles de l'ordre de la dizaine à la centaine, exceptionnellement quelques centaines, de kilogrammes de MgO (éventuellement de CaO). En général, ce sont les plantes acidophiles, ananas, hévéa, etc. qui en font l'objet. Il n'y a aucune différence de principe entre cet apport et une fumure potassique ou phosphorique.

— Elimination des toxicités aluminiques et manganiques; c'est habituellement l'objectif prioritaire recherché par les amendements calciques et calcomagnésiens. On l'obtient assez souvent par un relèvement du pH légèrement au-dessus de 5 et, à coup sûr, à pH égal ou supérieur à 5,5 (tout au moins dans les sols non affectés par l'hydromorphie).

— Amélioration de la fourniture aux plantes de nitrates et de phosphore :

La dynamique de l'azote et du phosphore, si l'on se place du strict point de vue de l'alimentation des cultures, est nettement meilleure entre pH 6 et 7,5 qu'aux pH inférieurs. Bien que les rendements continuent à croître si la réaction du sol croît progressivement de 6 à 7,5, on a l'habitude de considérer en pays tropicaux qu'un pH de 6 ou légèrement supérieur à 6 est suffisant, en particulier pour le riz irrigué qui préfère des pH de 5,5 à 6 et les plantes très acidophiles : hévéa, ananas, théier, palmier à huile, etc. qui se plaisent en terrains encore plus acides).

En définitive, dès qu'il n'y a pas carence ou déficience en magnésium (et éventuellement en calcium), tout revient à conserver un pH favorable au sol s'il existe ou à l'amener à une valeur telle qu'il soit possible d'obtenir des rendements acceptables.

6.2. Quand faut-il chauler ?

En sol de pH 6 ou compris entre 5,5 et 7

On peut se contenter d'apports d'entretien destinés à compenser les pertes : exportations par les récoltes, lixiviation y compris celle qui est engendrée par les engrais azotés, éventuellement par l'érosion.

En fait, il ne s'agit là que d'un vœu pieux. Pratiquement, agriculteurs et agronomes ne se préoccupent que rarement de la diminution des niveaux calciques et magnésiens et de la baisse de pH qui l'accompagne inéluctablement. Il y a des excuses à ce comportement : la faible rentabilité (sauf exception) des cultures n'incite guère le paysan à effectuer des investissements onéreux dont il ne voit pas l'intérêt.

Mais il arrive un moment auquel ils deviennent nécessaires si l'on veut continuer à cultiver le même sol.

Cette limite se situe à pH 5,5 pour l'arachide cultivée dans les sols sableux du centre du Sénégal. De façon assez générale, on peut la placer à peu près entre pH 4,0 et pH 5,5 dans le monde intertropical. Cela dépend et de la sensibilité de la plante à l'aluminium échangeable et de la faculté que possède chaque type de sol de fixer cet élément en quantité plus ou moins importante sur son complexe absorbant.

En sol de pH acide pH < 5,5

Un premier apport d'amendement dit de correction ou de fond a pour tâche de ramener le pH à une valeur acceptable pour la culture envisagée.

On a vu que pH 5,25 était suffisant pour la majorité des cultures de l'Ouganda, qu'il fallait pH 5,5 pour l'arachide dans le centre du Sénégal mais que dans cette même région le mil acceptait pH 4,5.

Pour des raisons de prix de revient, on se contente souvent d'arriver à l'extrême limite de tolérance de la plante : par exemple à pH 5,0-5,1 pour les sols argileux du Niari (Congo), ce qui est acceptable, bien que non optimum, pour l'arachide, mais interdit de cultiver le cotonnier; au Brésil, la seule neutralisation de l'aluminium échangeable est prise en compte le plus souvent; on s'efforce en culture bananière de Côte d'Ivoire d'arriver simplement à pH 5,5, car le supplément de récolte obtenu dans un sol plus neutre ne compense pas le prix des amendements supplémentaires à ajouter.

6.3. Amendements de fond et d'entretien

Il ne suffit pas de corriger le pH, ainsi que les niveaux calciques et magnésiens du sol qui le conditionnent. Encore faut-il les entretenir à ces valeurs.

La lixiviation des bases du sol, les exportations par les récoltes, pertes inéluctables, concourent à les affaiblir année après année.

Aussi quelques années après un apport massif, dit de fond, qui permet d'obtenir le pH souhaité, faut-il renouveler l'opération pour arriver à le conserver. On peut évidemment forcer la dose initiale pour retarder l'échéance mais aux prix d'une lixiviation accrue; on se trouve confronté 4, 5 ou 7 ans plus tard au même coûteux investissement.

Aussi recommande-t-on souvent, comme actuellement à Madagascar ou au Brésil, de faire des apports modérés tous les ans ou tous les deux ans ou trois ans afin de garder au sol ses caractéristiques initiales, si elles sont acceptables, ou celles que lui a donné un premier apport de correction (fumure de fond).

Cela paraît simple, mais en fait c'est toute une mentalité dont il faut changer le comportement; jusqu'à présent l'agriculteur accepte assez volontiers d'apporter une fumure NPK dont il voit les effets dans l'année, mais fort mal un amendement calcique et magnésien dont le but, peu visible, est simplement

d'entretenir les potentialités du sol. La solution est peut-être d'offrir sur le marché des engrais vraiment « complets », c'est-à-dire comportant à la fois N.P.K. Ca et Mg. Malheureusement, si l'on en juge par l'essai réalisé à Madagascar (chap. VI § 4.4) son prix est supérieur à celui des produits pris séparément. Malgré tout, c'est peut-être là que réside la possibilité d'avenir.

Une précaution élémentaire consiste à ne pas bouleverser d'un coup les propriétés du sol par des apports massifs d'amendements, mais à les échelonner année après année de façon à les modifier progressivement. On arrive ainsi dans beaucoup de cas à atténuer les répercussions du chaulage et sur la minéralisation de la matière organique et sur l'assimilabilité des oligo-éléments. En somme, il s'agit de laisser au sol le temps de « s'adapter ». A ce point de vue, les calcaires et dolomie grossièrement broyés, donc à dissolution relativement lente, sont préférables aux chaux magnésiennes et calciques à action plus brutale.

Conclusion générale

Peut-être faut-il souligner une fois de plus la contradiction apparente qu'il y a entre des besoins limités des plantes en calcium et magnésium du sol, besoins extrêmement faibles pour le calcium, un peu plus élevés pour le magnésium (mais du même ordre de grandeur que pour le potassium, infiniment moins abondant dans le sol que ces deux cations) et la nécessité pour le sol de contenir ces deux éléments en abondance si l'on veut obtenir des récoltes correctes.

C'est que, contrairement aux autres nutriments des végétaux (azote, phosphore, potassium, soufre, oligo-éléments), le calcium surtout et le magnésium (dans une mesure moindre) apparaissent comme des constituants essentiels des sols, constituants qui conditionnent nombre de propriétés physico-chimiques indispensables à l'agriculture : structure favorable à l'enracinement, élimination des toxicités manganique et aluminique, assimilabilité de l'azote et du phosphore; le pH du sol, notion qui synthétise au moins approximativement ces facteurs, est lui-même largement sous la dépendance de la saturation en calcium et en magnésium échangeables du complexe absorbant.

Or les transformations pédologiques qui se produisent au cours de la phase de formation, puis de maturité des sols en place, appauvrissent toujours l'ensemble du profil en ces deux éléments, (sauf en climat aride où il peut y avoir accumulation avec, parfois, formation de croûte et d'encroûtements). Un tel processus est particulièrement net sous les tropiques où, de façon générale, le drainage dépasse l'évapotranspiration réelle. Cela commence par une élimination extrêmement sévère au stade de l'altération de la roche, et se continue par un appauvrissement lent en surface et dans le profil par entraînement par les eaux de percolation. A vrai dire, différents mécanismes peuvent compenser ou masquer ces pertes : l'altération des résidus de la roche-mère, s'il en existe encore, ou des minéraux de formation secondaire peut faire apparaître calcium et magnésium échangeables; les remontées biologiques, essentiellement par la végétation mais aussi par la faune du sol (termites, vers de terre...), y contribuent aussi de façon appréciable; enfin les apports par la pluie, bien que faibles en valeur absolue, ne doivent pas être oubliés. De telle sorte qu'à l'échelle humaine, les caractéristiques générales d'un sol, non perturbé, recouvert de sa végétation naturelle, apparaissent comme à peu près stables, y compris les teneurs en calcium et en magnésium.

Mais l'évolution pédologique n'en continue pas moins; de faible ampleur en climat semi-aride, elle croît en intensité au fur et à mesure que la pluvio-

sité augmente, et conduit, surtout lorsque les précipitations annuelles dépassent 1 700 mm, à des sols extrêmement pauvres en nutriments minéraux dans lesquels les bases échangeables (essentiellement calcium et magnésium) ne saturent plus qu'une faible fraction du complexe absorbant.

Le défrichement et la culture ont pour conséquence de détruire la végétation, donc de briser un important mécanisme compensateur de l'élimination des nutriments minéraux hors du profil; il s'y ajoute quelques processus qui aggravent les pertes, comme l'érosion, les exportations par les récoltes, l'acidification du sol par les fumures minérales.

Cette rupture d'équilibre reste limitée dans le temps et l'espace dans le cas de la culture itinérante; elle atteint une ampleur d'autant plus forte que l'on cherche à intensifier la productivité agricole par réduction de la durée des friches. Ce passage de l'agriculture tropicale vers des schémas semi-intensifs et intensifs apparaît inéluctable à plus ou moins long terme; il entraînera un affaiblissement des teneurs du sol en cations alcalino-terreux, calcium et magnésium, en même temps d'ailleurs que pour d'autres nutriments.

Mais au contraire de ce qui se passe pour l'azote ou le potassium, l'appauvrissement d'un sol en calcium et magnésium ne retentit pas immédiatement, sauf exception, sur les rendements des cultures, qui restent un certain temps sous la dépendance d'autres facteurs, jusqu'au moment où de graves accidents, toxicités dues à l'aluminium et au manganèse le plus souvent, rendent la terre improductive faute de quantités suffisantes de calcium et de magnésium.

Certes les plantes cultivées réagissent défavorablement dès que les teneurs du sol en magnésium échangeable s'abaissent au-dessous de 0,30 mé/100 g (seuil moyen de déficience) et surtout de 0,10-0,17 mé/100 g (seuil moyen de carence); certes leurs comportements physiologiques se ressentent fortement des déséquilibres ioniques qui peuvent exister dans le sol, déséquilibres que l'on exprime souvent par les rapports Ca/Mg, Mg/K, Ca + Mg/K en particulier, mais les répercussions néfastes d'un déficit calcique (surtout) et magnésien doivent surtout être recherchées dans les propriétés des sols, que l'on a l'habitude de résumer par la considération du pH.

Dès que la réaction du sol s'abaisse par trop (pH inférieur à 5,0-5,5 assez souvent), l'aluminium se fixe avec énergie sur le complexe absorbant où il tend à engendrer des toxicités redoutables, le manganèse se met sous forme hautement soluble et s'il est abondant devient toxique également, l'assimilabilité du phosphore et de l'azote du sol décroît fortement, la vie bactérienne, et en particulier celle qui concerne le cycle de l'azote, est sérieusement ralentie et parfois même anéantie (rhizobium des légumineuses).

Un déséquilibre entre les proportions relatives de calcium et de magnésium peut affecter les propriétés structurales des sols comme cela se passe pour un rapport Ca/Mg inférieur à 1, à vrai dire plus dans les sols contenant une certaine quantité d'illite et de montmorillonite que dans ceux qui sont purement kaoliniques.

Les plantes réagissent de façon variable: certaines réputées acidophiles, supportent bien, et quelquefois même préfèrent, les sols acides; ce sera le cas, en particulier, du théier, de l'hévéa, de l'ananas, du palmier à huile..., encore que des pH de l'ordre de 4 ne leur soient que rarement favorables (pH qui correspondent à une désaturation extrêmement importante du complexe absorbant du sol en bases échangeables, donc au premier chef en calcium et magnésium). Toutefois la majeure partie des plantes cultivées, si elles s'accoutument assez souvent d'une réaction acide du sol, parfois jusqu'à des pH inférieurs à 5, le font au détriment de leur équilibre physiologique; elles ne donnent des rendements acceptables, que si le milieu n'est pas trop acide (pH de 5,5 à 7).

Comme l'intensification culturale a pour conséquence un appauvrissement accru du sol en calcium et magnésium, il est nécessaire de prévoir une certaine restitution. Celle-ci est techniquement possible par le fumier de ferme le compost ou le paillage, mais s'avère économiquement peu rentable ou difficile à mettre en œuvre dans le contexte socio-économique de l'agriculture tropicale actuelle. Aussi lui préfère-t-on le plus souvent les amendements minéraux calciques ou mieux calco-magnésiens. Ceux-ci ont en outre l'avantage d'effectuer une fertilisation « absolue » en Ca et Mg (et également en d'autres éléments), au lieu d'un transfert de fertilité de terres exploitées extensivement à d'autres qui le sont intensivement, comme avec le paillage.

Mais cette technique, malgré des succès indéniables, n'en soulève pas moins un certain nombre de difficultés. En premier lieu son prix de revient toujours élevé par rapport à la rentabilité assez modeste de l'agriculture tropicale, l'a surtout fait réserver jusqu'à présent à des cultures « riches » du type bananiers, cacaoyers, caféiers, etc. plus qu'aux plantes vivrières. La sensibilité au drainage des apports calco-magnésiens, leur fixation décevante sur le complexe absorbant du sol, surtout s'il s'agit des horizons profonds, rendent souhaitable une action de recherche pour valoriser au maximum l'opération coûteuse qu'est la correction des propriétés du sol par chaulage. Malgré tout, cette opération apparaît comme la seule possible sur une grande échelle dans les sols intensément cultivés.

On peut penser qu'à échéance peu éloignée les apports calco-magnésiens seront tout aussi indispensables que les fumures N, P, K dont l'emploi se développe lentement sous les tropiques.

L'agriculture tropicale va se trouver inéluctablement confrontée à plus au moins long terme (quand il ne s'agit pas d'une nécessité immédiate comme pour le Brésil, le Sénégal, etc.) à l'obligation de conserver le potentiel calco-magnésien de ses sols par des restitutions adéquates, en plus des « coups de fouet » aux rendements que sont les fumures azotées, potassiques et phosphoriques.

Le protectionnisme agricole actuel des pays de la communauté européenne souligne bien le contraste qui existe entre une vieille agriculture où l'on est conduit à effectuer des restitutions de tous les nutriments et celle des pays neufs où l'on ne s'en préoccupe encore qu'assez peu. Bien qu'il soit toujours délicat de vouloir prédire l'avenir, on peut penser qu'au fur et à mesure que l'agriculture tropicale « vieillira », les impératifs techniques, qui conditionnent son développement, évolueront dans le sens d'un rapprochement avec ceux des pays tempérés de civilisation agricole déjà millénaire.

BIBLIOGRAPHIE

- ABRUNDA-RODRIGUEZ (F.), VICENTE-CHANDLER (J.), PEARSON (R.W.), SILVA (S.), 1970. — Crop response to soil acidity factors in ultisols and oxisols-I-Tobacco. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 4, 629-635.
- ADAMS (F.), EVANS (C.E.), 1962. — A rapid method for measuring lime requirements of red yellow podzolic soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26; 355-357.
- ADAMS (F.), PEARSON (R.W.), 1967. — Crop response to lime in the Southern United States and Puerto Rico. In PEARSON (R.W.) et ADAMS (F.). *Soil Acidity and Liming. Agronomy*, 12; 161-206.
- AHMAD (N.), TULLOCH-REID, DAVIS (C.E.), 1969. — Fertilizers studies on Pangola Grass (*Digitaria decumbens*, Stent.) in Trinidad II. Effect of Phosphorus, Potassium and Magnesium. *Trop. Agric. (Trin.)*, 46, 3; 179-186.
- AKEHURST (B.C.), SREEDHARAM (A.), 1965. — Time of planting. A brief review of experimental work in Tanganika 1956-1962. *E. Afr. Agric. for J.*, 30; 181-201.
- ANDERSON (A.J.), 1956. — Molybdenum and symbiotic nitrogen fixation. *Australian Counc. Sc. Ind. Research. Bull.*, 198; 7-24.
- ANDERSON (A.J.), LONERAGAN (J.F.), MEYER (D.), FAUCET (R.G.), 1956 — Establishment of legumes on acids soils. *Rural Research in CSIRO* (Australia).
- ANDREW (R.L.), 1942. — Reversion of Ca superphosphate by serpentine. *New Zeal. Jour. Sci. and Technol.*, 23 B; 208-209.
- ANDREWS (D.J.), 1972. — Intercropping with sorghum in Nigeria. *Exper. Agric.*, 8-2, 139-150.
- ASHRIF (M.I.), 1963. — Effet du calcium sur l'arachide. *Oléagineux*, 18, 11; 680-683.
- ASKEW (H.O.), 1942. — The course of the reactions occurring between serpentine and superphosphate. *New Zeal. Jour. Sci. and Technol.*, 24 B; 128-134.
- BAILLY, BENOIT de COIGNAC, de VERGNETTE, 1967, — Influence du couvert naturel et de sa modification sur le ruissellement et les pertes en terre. *Coll. Fert. Sol Tropicaux, Tananarive*, 15-25 nov. 1967, 2; 1332-1361.
- BARROW (N.Y.), 1972. — Influence of solution concentration of calcium on the absorption of phosphate, sulphate and molybdate by soils. *Soil. Sci.*, 113, 3; 175-180.
- BARTOLOMEW (W.V.), MEYER (I.), LAUDELOUT (H.), 1953. — Mineral nutrient immobilisation under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgium Congo) region. *Pub. INEAC (Bruxelles), Série Sci.*, 57, 27 p.
- BATES (J.A.R.), 1960. — Studies on Nigerian forest soil. I. The distribution of organic matter in the profile and in various soil fractions. *Journal Soil Science*, 11, 2; 246-256.
- BEAR (F.E.), TOTH (S.J.), 1948. — Influence of calcium on availability of other actions". *Soil Sci.*, 65; 69-74.

- BECKETT (P.H.T.), 1964. — Potassium-calcium exchange equilibria in soils: specific absorption sites for potassium. *Soil Sci.*, 97, 6; 376-386.
- 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., miméo.
- BERNARD (F.), 1969. — Rapport d'activité. ORSTOM Adiopodoumé-Abidjan, miméo 22 p.
- BERTRAND (R.), 1967. — Etude de l'érosion hydrique et de la conservation des eaux et du sol en pays Baoulé (Côte d'Ivoire). Coll. fert. Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 nov. 1967, II; 1281-1925.
- BERTRAND (R.), NABOS (J.), VICAIRE (R.), 1972. — Exportations minérales par le mil et l'arachide. Conséquences sur la définition d'une fumure d'entretien d'un sol ferrugineux tropical développé sur matériau éolien à Tarna (Niger). *L'Agron. Tropic.* 27, 12; 1287-1303.
- BIRCH (W.R.), 1960. — High altitude ley agronomy in Kenya. III The effects of lime and molybdenum and some observations on the use of legumes. *East afric. Agric. and For J.*, 25, 3; 156-164.
- BIRCH (H.F.), 1952. — The relationship between phosphate response and base saturation in acid soils. *J. Agric. Sci.*, 42; 276-285.
- BIRCH (H.F.), 1953 a. — Phosphate response, base saturation and silica relationship in acid soils. *J. Agric. Sci.*, 43; 230-235.
- BIRCH (H.F.), 1953 b. — The relationship in acid soils between base saturation and phosphorus uptake by grasses. *J. Agric. Sci.*, 43; 329-333.
- BIRCH (H.F.), 1953 c. — The relationship between phosphate response and base saturation, pH and silica content of acid soils. *Proc. conf. on crop resp. to fert. and man.* E.A.A.F.R.O., 2-3 fev. 1953, p. 10.
- BISHOP (R.F.), COOK (R.L.), 1958. — Laboratory and greenhouse studies on effect of lime and other amendments on water soluble boron in soils. *Canad. J. Soil Sci.*, 38, 1, 27-35.
- BLONDEL (D.), 1967. — Importance réelle des pertes par volatilisation de l'ammoniaque en sol sableux (Dior). Coll. Fert. Sols Tropicaux, Tananarive 19-25 nov. 1967; 500-508.
- BLONDEL (D.), 1970. — Relation entre « nanisme jaune » de l'arachide en sol sableux (Dior), et le pH; définition d'un seuil pour l'activité du Rhizobium. *L'Agron. Tropic.* XXV, 6-7; 589-595.
- BLONDEL (D.), 1971 a. — Evolution de l'azote minéral en sol ferrugineux tropical sous culture de mil (*Pennisetum typhoides* J.). Séminaire C.S.T.R./O.U.S. sur les facteurs du milieu qui influencent le rendement des cultures céréalières en Afrique Tropicale, Dakar 26-69 juillet 1971.
- BLONDEL (D.), 1971 b. — Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux (Dior) au Sénégal. Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à Sefa (Sénégal). « Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol ferrugineux tropical à Nioro du Rip (Sénégal) ». *L'Agron. Tropic.*, 26, 12; 1303-1333, 1334-1353, 1354-1361.
- BOCQUET (M.), MICHAUX (P.), 1961. — Choix d'une méthode d'ouverture en forêt pour une plantation de palmier à l'huile. *Oléagineux*, 16; 149-154.
- BOISSEZON (P. de), 1973. — La matière organique des sols ferrallitiques. In Les sols Ferrallitiques, t4. La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques p. 9-66, ORSTOM (Paris), Série Initiation, Documentation technique.
- BOISSEZON (P. de), GRAS (F.), 1970. — Notice explicative n° 44. Carte Pédologique Sibiti-Est (Rep. du Congo-Brazzaville) au 1/500 000. Centre ORSTOM, Brazzaville, 1 vol., 144 p. (carte en couleur).
- BOLLES-JONES (E.W.), 1954. — The interrelationships of magnesium, potassium and phosphorus and their effect on the growth and composition of *Hevea brasiliensis*. 5° cong. Intern. Sciences du sol (Léopoldville), 1954, III, 176-181.

- BOLLES-JONES (E.W.), 1957 a. — Magnesium-manganese inter-relationship in the mineral nutrition of *Hevea brasiliensis*. *J. Rubb. Res. Inst. Malaya*, 15; 22-28.
- BOLTON (J.), SHORROCKS (V.M.), 1961. — The effects of magnesium, limestone and other fertilizers on a mature planting of *Hevea brasiliensis*. *J. Rubb. Res. Inst. Malaya*, 1961, 17; 31-39.
- BONFILS (P.), FAURE (J.), 1961. — Etude des sols du Bao-Bolon. *L'Agron. Trop.*, XVI, 2; 127-147.
- BONIFAS (M.), 1959. — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Thèse doct. Univers. (Strasbourg), *Mem. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 17, 159 p.
- BONNIER (C.), 1957. — Symbiose Rhizobium-légumineuses en région équatoriale. Pub. I.N.E.A.C. Bruxelles, Série Scientifique, N° 17, 67 p.
- BONTE (E.), 1967. — La culture du théier au Burundi. *Annales de Gembloux*, 73, 2: 105-111.
- BOUCHY (C.), 1970. — Contribution à l'étude des déficiences minérales en culture cotonnière en Côte d'Ivoire. *Coton Fibres Trop.* (Paris), 25, 2: 235-251.
- BOUCHY (C.), 1973. — Essai de fertilisation organo-minérale. Résultats après dix années de culture continue Maïs-Cotonnier en Côte d'Ivoire. *Coton. Fibres Trop.* (Paris), 28, 3: 343-364.
- BOURGEAT (F.), HUYNH VAN NHAN, VALLERIE (M.), ZEBROWSKI (C.), 1973. — Relation entre le relief, les types de sols et leurs aptitudes culturales sur les hautes terres malgaches. *C.R. Acad. Agric. F.* (Paris), 59, 10: 773-780.
- BOUTEYRE (G.), LEPOUTRE (B.), 1959. — Premiers résultats sur l'étude de l'évolution des sols jeunes sur argiles récentes et argiles à nodules calcaires du Logone. Troisième conférence interafricaine des sols, Dalaba 1959, Vol. II: 899-907.
- BOUYER (S.), 1954. — Composition et fertilité des terres à Arachide en Afrique occidentale. Ministère France Outre-Mer, Bull. Agronomie, 12: 68-74.
- BOUYER (S.), 1959. — Etude de l'évolution du sol dans un secteur de modernisation agricole du Sénégal. Troisième conférence interafricaine des sols, Dalaba, 1959, Vol. II: 841-850.
- BOUYER (S.), DABIN (B.), 1963. — Etudes pédologiques du delta central du Niger. *L'Agron. Tropic.*, XVIII, 12: 1300-1306.
- BOYER (J.), 1972. — Soil Potassium. In soils of the humid tropics; 102-135, National Academy of Science publ. (Washington).
- BOYER (J.), 1973. — Comportement du potassium dans les sols tropicaux cultivés. 10° coll. Inst. Inter. Potasse, Abidjan, 3-7 dec. 1973: 83-102.
- BOYER (J.), 1976. — L'aluminium échangeable: incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité. *Cahiers O.R.S.T.O.M. Sér. Pédol.*, IX, 4: 259-269.
- BOYER (Ja.), 1973. — Cycles de la matière organique et des éléments minéraux dans une cacaoyère camerounaise. *Café, Cacao, Thé* (Paris), 17, 1: 3-24.
- BOYER (Ph.), 1956. — Les bases totales dans les matériaux de la termitière de Bellicositermes natalenses Hav. C.R. Congrès Inter. Science du Sol, Paris, III, 17: 105-110.
- BRAMS (E.A.), 1971. — Continuous cultivation of West African soils: organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and soils* (the Hague), 35: 401-414.
- BRINKMANN (W.L.F.), 1972. — Nutrient cycling in natural regions of central Amazonia. VI. Soluble calcium. Seminar for trop. ecol. C.E.P.L.A.C.-C.E.P.E.C. (Brésil), juin 1972, (cité par Boyer Ja.), 1973.
- BRINKMANN (W.L.F.), NASCIMENTO (J.C. de), 1973. — The effect of slash and burn agriculture on plant nutrients in the tertiary region of central Amazonia. *Turrialba*, 23, 3: 284-290.
- BROWN (J.C.), FOY (C.D.), 1964. — Effect of Cu on the distribution of P, Ca and Fe in barley plants. *Soil Sci.*, 98, 6: 362-370.
- BRUGIERE (J.M.), 1956. — Etude des sols à caféiers du 2^e Secteur du Moyen Congo. Brazzaville, 1956.

- BRUN (J.), CHAMPION (J.), 1953. — Le « Bleu » du Bananier en Guinée Française. *Fruits* (Paris), 8, 6 : 266-269.
- BRUNIN (Ch.), 1970. — La nutrition magnésienne des cocoteraies de Côte d'Ivoire. *Oléagineux*, 25, 5 : 269-274.
- BURSTROM (H.), 1952. — Studies on growth and metabolism of root. VIII calcium as a growth factor. *Physical. Plant.*, 5 : 391-402.
- BUSCH (J.), 1958. — Etude sur la nutrition minérale du Caféier Robusta dans le Centre et l'Ouest Oubangui. *L'Agron. Tropic.*, XIII, 6 : 732-760.
- CABALALA-ROSAND (F.P.), PIRES do PRADO (R.), MIRANDA (E.R.), SANTANA (Ma.B.), FONSECA (R.). — Deficiências minerais no cacao. Segunda conferencia internacional de pesquisas em cacao, nov. 1967, Bahia Brésil : 436-441.
- CABANETTES (J.P.), LE BUANEC (B.). 1974. — Etude de l'apparition d'une carence potassique dans un sol ferrallitique sur granite. *L'Agron. Tropic.*, 29, 6-7 : 675-684.
- CADIMA-ZEVALLOS (A.), 1966. — Influencia da Erythrina glauca sobre alguns fatores edáficas associados com or producao do solo Sao Paulo. Primeiro congresso pan americano de conservacao do solo, 12-29 abril Sao Paulo Brésil : 187-194.
- CARVAJAL (J.F.), 1972. — Cafeto cultivo y fertilizacion. Institut Intern. Potasse (Bern) Edit. 141 p.
- CELTON (J.), ROCHE (L.), VELLY (J.), 1973. — Acidité du sol et chaulage. *L'Agron. Tropic.*, 28, 2 : 123-130.
- CHAMPION (J.), DUGAIN (F.), DOMMERGUES (Y.), MAIGNIEN (R.), 1958. — Les sols de bananeraies et leur amélioration en Guinée Française. *Fruits*, 13, 9-10 : 415-462.
- CHANG (S.C.), CHU (W.K.), 1961. — The fate of soluble phosphate applied to soils. *Jour. Soil Sci.*, (Oxford), 12, 2 : 286-293.
- CHARREAU (C.), 1972. — Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *L'Agron. Trop.*, 27, 9 : 905-929.
- CHARREAU (C.), FAUCK (R.), 1970. — Mise au point de l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa (CASAMANCE). *L'Agron. Trop.*, XXV, 2 : 151-192.
- CHARREAU (C.), VIDAL (P.), 1965. — Influence de l'Acacia Albida Del. sur le sol. Nutrition minérale et rendements des mils pennisetum au Sénégal. *L'Agron. Tropic.*, XX, 6-7 : 600-626.
- CHAN (H.Y.), PUSHPARAJAH (E.), 1972. — Productivity potentials of Hevea on west Malaysian soils : a preliminary assessment. Proc. Rubb. Res. Inst. Malaya First Conf. (Kuala Lumpur), 97.
- CHENERY (E.M.), 1954. — Minor element in Uganda Soils Proc. Second Inter-african soils conference Léopoldville, 2 : 1157-1163.
- CHENERY (E.M.), SCHOENMAEKERS (J.), 1959. — Magnesium deficiency in east african tea. *East Afric. Agric. J.*, 21, 1 : 25-27.
- CHENG (B.T.), OUELETTE (G.J.), 1971. — Manganese availability in soils. *Soils and Fertilizers*, 34, 6 : 589-595.
- CLAIRON, 1969. — Etude expérimentale de l'influence du chaulage sur la mobilité du magnésium et du potassium dans deux types de sols acides. *Bull. A.F.E.S.* (Paris), 2, 3-6.
- COCHEME (J.), FRANQUIN (P.), 1967. — Une étude d'Agroclimatologie de l'Afrique sèche au sud du Sahara en Afrique Occidentale. Projet conjoint d'Agroclimatologie F.A.O., U.N.E.S.C.O., O.M.M., F.A.O. Rome, 1967.
- COELHO (F.S), VERLENGIA (F) — Fertilidade do solo. Edit. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, CAMPINAS S.P. (Brésil) : 384 p.
- COINTEPAS (J.P.), 1956. — Premiers résultats des mesures d'érosion en Moyenne Casamance (Sénégal). 6^e Congrès International de la Science du sol, Paris, VI, 15 : 569-576.
- COLEMAN (N.T.), RAGLAND (J.L.), CRAIG (D.), 1960. — An unexpected reaction between Al-clay or Al-soil and Ca Cl₂. *Soil Sic. Soc. Proc.*, 21 : 419-420.

- COLLINS (J.B.), WHISIDE (E.P.), CRESS (C.E.), 1970. — Seasonal variability of pH and lime requirements in several southern Michigan soils when measured in different ways. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 1: 56-62.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J.), GAUTHEYROU (M.), KIMPE (C.), SIEFFERMANN (G.), DELAUNE (M.), FUSIL (G.), 1970. — Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte Pacifique du Nicaragua. *Cahiers O.R.S.T.O.M. Sér. Pédol.*, VIII, 2: 113-172.
- COMBEAU (A.), MONNIER (G.), 1961. — Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux. *Sols Africains*, VI, 1: 5-62.
- COOPER (H.P.), PADEN (W.R.), GARMAN (W.H.), 1947. — Some factors influencing the availability of magnésium in soil and the magnésium content of certain plants. *Soil Sci.*, 63, 1: 27-41.
- COPPENET (M.), 1969. — Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper. *Ann. Agron.*, 20, 2: 111-143.
- COULTER (J.K.), 1972. — Soils of Malaysia. A review of investigations on their fertility and management. *Soils and Fertilizers*, 35, 5: 475-498.
- COULTER (J.K.), ROSENQUIST (E.K.), 1955. — Mineral nutrition of the oil palm. A study of the chemical composition of the frond in relation to chlorosis and yield. *Malayan Agric. J.*, 38: 214-236.
- COURS (G.), FRITZ (J.), RAMAHADIMBY (G.), 1961. — Le diagnostic phello-dermique du manioc. *Fertilité*, N° 12: 3-20.
- CROWDER (L.V.), MICHELIN (A.), BASTIDAS (A.), 1964. — The response of Pangola grass (*Digitaria decumbens* stent.) to rate and time of nitrogen application in Colombia. *Tropic. Agric.*, (Trin), 41, 1: 21-29.
- CULOT (J.P.), VAN WAMBECKE (A.), 1958. — Contribution à l'étude des déficiences minérales du caféier d'Arabie au Kivu. Publ. I.N.E.A.C., Série Scientifique, N° 73, 105 p.
- CUNNINGHAM (R.K.), 1964. — Micronutrient deficiency in cacao in Ghana soils. *Emp. J. Exper. Agric.*, 32, 125: 42-50.
- DABIN (B.), 1954. — Les problèmes de l'utilisation des sols à l'Office du Niger. 2^e Conférence Interafricaine des sols, Léopoldville, 1954, II, 92: 1162-1176.
- DABIN (B.), 1956. — Considérations sur l'interprétation agronomique des analyses de sols en pays tropicaux. *Cong. Int. Sci. Sol (Paris)*, 1956, 6, IV, 58: 403-409.
- DABIN (B.), 1961. — Les facteurs de la fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. *Bull. Ass. fr. Et. Sol*, N° spécial: 108-130.
- DABIN (B.), 1964. — Analyse physique et fertilité dans les sols des régions humides de Côte d'Ivoire. *Cahier O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, 1: 29-40.
- DABIN (B.), 1970. — Les facteurs chimiques de la fertilité des sols (Matière organique; phosphore). In *Techniques Rurales en Afrique*, N° 10 (Pédologie et Développement) chap. X: 191-219.
- DABIN (B.), 1971. — Evolution des engrais phosphatés dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée. *Phosphore et Agriculture*, 58: 1-14.
- DABIN (B.), LENEUF (N.), 1960. — Les sols de bananeraies en Côte d'Ivoire. *Fruits*, 15, 3: 117-127.
- DEAT (M.), DUBERNARD (J.), JOLY (A.), SEMENT (G.), 1976. — Exportations minérales du cotonnier et de quelques cultures tropicales en zone de savane africaine. *Coton Fibres Trop.*, 31, 4: 409-418.
- DEAT (M.), SEMENT (G.), 1974. — Les résidus de récolte du cotonnier. In *Atelier du 14 janvier 1974 sur les résidus de récolte des principales plantes cultivées en Côte d'Ivoire*. Document O.R.S.T.O.M., miméo.
- DE GEUSS (J.G.), 1967. — Fertilizer guide for tropical and subtropical farming. Centre Etude de l'Azote, Zurich.
- DELHAYE (R.J.), 1970. — Fumure du pyrèthre - Rétrospective de l'expérimentation au Congo et au Rwanda de 1948 à 1962. *Bull. des recherches agron. de Gembloux*, V, 1 et 2: 177-187.

- DEMOLON (A.), 1952. — Principes d'Agronomie, I Dynamique du sol. 5^e Edition Dunod Edit. (Paris), p. 468-470.
- DEMOLON (A.), 1968. — Principes d'Agronomie. II Croissance des végétaux cultivés (chap. IX). Dunod (Paris) Edit., 590 p.
- DEMOLON (A.), AUBERT (G.), 1952. — C.R. Acad. Sci. (Paris), t. 234, p. 689, cités par Demolon, 1968.
- DEMPWOLF (O.), 1869. — Untersuchung des ungarischen Waizens und Waizennebo. *Liebig's Ann. Chem.* 149 : 343-350.
- DENNIS (E.A.), TRUONG BINH, 1974. — A propos de la détermination du calcium isotopiquement diluable - Valeur L. *L'Agron. Trop.*, 29, 12, 1263-1265.
- DEUSS (J.), 1967. — Protection de la fertilité du sol et modes de couverture utilisés en culture caféière en République Centrafricaine. *Café, Cacao, Thé* (Paris), XI, 4 : 312-320.
- DOMMERMUES (Y.), 1960. — Un exemple d'utilisation des techniques biologiques dans la caractérisation des types pédologiques. *L'Agron. Tropic.*, XV, 1 : 60-72.
- DOMMERMUES (Y.), 1963. — Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. *Rev. Bois et Forêts des Tropiques*, 87 : 9-25.
- DOMMERMUES (Y.), MANGENOT (F.), 1970. — Ecologie microbienne du sol. Masson Editeur (Paris), 786 p.
- DRUZHININ (D.V.), 1936. — The use of dunite for improving the properties of superphosphate. *Zischr. Pflanzenernäh, Düngung., U., Bodenk.*, 45 : 303-305.
- DUBERNARD (J.), 1975. — L'apparition d'une déficience potassique au cours de rotations coton-cultures vivrières sur un sol ferrallitique de République Centrafricaine. *Coton Fibres Trop.*, 30, 2 : 263-270.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1965. — Précis de Pédologie. Edit. Masson (Paris), 481 p.
- DUGAIN (F.), 1959. — Le sulfate d'ammoniac dans le sol en culture bananière de bas fonds. *Fruits*, 14, 4 : 163-169.
- DUGAIN (F.), 1960. — Etude sur la fertilité des sols de la plaine bananière du Cameroun. *Fruits* (Paris), 15, 4 : 153-170.
- DUGAIN (F.), 1960. — Les analyses de sol et le « Bleu » du bananier. 1^{re} Réunion Internationale Bananier, F.A.O., et C.C.T.A., Abidjan.
- DURAND (R.), DUTHIL (P.), 1971. — Premiers résultats sur l'altération expérimentale des roches calcaires et dolomitiques. *Ann. Agron.*, 22, 4 : 397-424.
- EATON (F.M.), Mc LEAN (G.W.), BREDELL (G.D.), DONER (H.E.), 1968. — Significance of silica in the loss of magnesium from irrigation water. *Soil Sci.*, 105, 4 : 260-280.
- EGNER (H.), RIEHM (H.), DOMINGO (W.R.), 1960. — Untersuchungen Über die chemische Bodenanalysen als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Boden. II chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor und Kaliumbestimmung. *K. Lantler-Hogsk. Ann.*, 26 : 199-215.
- EVANS (H.), 1955. — Studies in the mineral nutrition of sugar cane in British Guiana. *Trop. Agric. (Trin)*, 32, 2 : 124-133.
- FALESI (I.C.), 1972. — Solo da rodovia transamazônica. *I.P.E.A.N. Boletim técnico*, N° 55 Belém, Para (Brésil), 195 p.
- FASSBENDER (H.W.), 1969. — Retencion y transformacion de fosfates en ochrolatosolos de la Amazonia del Brasil. *Fitotecnica latino americana*, 6, 1 : 1-10.
- FASSBENDER (H.W.), VIEIRE (L.), STABILE (M.E.), 1970. — Equilibres cationiques et libération du potassium dans quelques sols de l'Amazonie du Brésil. *Revue de la potasse*, section 4, 46, nov. 1970, Berne (Suisse).
- FAUCK (R.), 1956 a. — L'évolution du sol sous culture mécanisée. Le problème du pH et sa correction. 6^e Congrès International de la Science du Sol (Paris), IV, 55 : 379-382.
- FAUCK (R.), 1956 b. — Le riz de culture sèche et l'évolution des sols. 6^e Congrès international de la Science du Sol (Paris), V, 12 : 549-533.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (C.), THOMANN (Ch.), 1969. — Bilans de l'évolution des sols de Sefa (Casamance Sénégal) après 15 années de culture continue. *L'Agron. Tropic.*, 3 : 263-301.

- FAUCONNIER (R.), 1962. — Aperçu sur quelques problèmes posés à la production de cannes à sucre dans la vallée du fleuve Sénégal et méthode expérimentale proposée. *L'Agron. Tropic.*, XVII, 7, 8 : 472-491.
- FAUCONNIER (R.), BASSEREAU (D.), 1970. — La canne à sucre. Maisonneuve et Larose (Paris) Edit., 468 p.
- FERREIRA DA SILVA (L.), OLIVEIRA DE MELO (A.A.), 1970. — Levantamento detalhado dos solos do centro de Pesquisas do cacau. Boletim técnico N° 1 C.E.P.L.A.C.-C.E.P.E.C., Itabuna, Bahia, Brésil, 88 p.
- FONSECA (R.), SANTOS (Z.G.), JESUS (A.F.), 1967. — Soil testing para cacau. Segundo conferencia intern. de pesquisas em cacau, Bahia, Brésil : 461-465.
- FORESTIER (J.), 1960. — Fertilité des sols de caféières en République Centrafricaine. III Etude des sols des caféières de la Lobaye. *L'Agron. Tropic.*, XV, 1 : 9-37.
- FORESTIER (J.), 1964. — Relations entre l'alimentation du Coffea Robusta et les caractéristiques analytiques des sols. *Café, Cacao, Thé*, VIII, 2 : 89-112.
- FORESTIER (J.), 1966. — Aspects nouveaux de l'emploi des engrais sur Coffea Robusta au Centre de Recherches de Boukoko (République Centrafricaine). *Café, Cacao, Thé*, X, 2 : 126-132.
- FORESTIER (J.), 1968. — Le potassium et le caféier Robusta. *Fertilité*, 30 : 3-63.
- FORSTER (H.L.), 1970. — Liming continuously cultivated soils in Uganda. *East Afric. Agric. and For. J.*, 36, 1 : 58-69.
- FOURNIER (F.), 1967. — La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent Africain. *Sols Africains*, XII, 1 : 5-52.
- FOX (R.L.), DE DATTA (S.K.), WANG (J.M.), 1964. — Phosphorus and aluminium uptake by plants from Latosols in relation to liming. Trans. 8 th Inter. Cong. Soil Sci. (Bucarest), 4 : 595-603.
- FOY (C.D.), 1974. — Effects of aluminium on plant growth. In the plant root and its environment, 601-642. Carson (E.W.) - Edt. Univ. Press of Va. box 3608 Univ. St. Charlottesville VA.
- FRANKART (H.), CROEGAERT (J.), 1959. — Contribution à l'étude de la nutrition minérale du caféier robusta en Uélé. I.N.E.A.C., Série Scientifique, N° 80, 107 p.
- FRANQUIN (P.), 1958. — L'estimation du manganèse du sol en rapport avec le phénomène de toxicité. *Coton Fib. Trop.*, XIII, 3 : 1-16.
- FRANQUIN (P.), MARTIN (G.), 1962. — Bilan d'eau et conservation du sol au Niari, République du Congo. *Coton Fib. Trop.*, XVIII, 3 : 345-356.
- FREITAS (L.M.N. de), VAN RAIJ (B.), 1975. — Residual effect of liming a latosol in São Paulo (Brazil). in Soil Management in Tropical AMERICA, C.R. du séminaire C.I.A.T., 10-14 fev. 1974, CALI, COLOMBIE, édité par North Carolina State University, RALEIGH, N.C., U.S.A.
- FREMOND (Y.), OUVRIER (M.), 1971. — Importance pour le cocotier d'une nutrition minérale convenable dès la plantation sur sable côtier. *Oléagineux*, 26, 10 : 609-616.
- FREMOND (Y.), ZILLER (R.), NUCE de LAMOTHE (M. de), 1966. — Le cocotier. Maisonneuve et Larose (Paris) Edit., 267 p.
- FRITZ (A.), VALLERIE (M.), 1971. — Contribution à l'étude des déficiences minérales sous culture cotonnière au Nord Cameroun. *Coton Fibr. Trop.* (Paris), 26, 3 : 273-301.
- GEHRING (A.), 1932. — Explanation of the action of different phosphoric acid fertilizer materials. *Superphosphate*, 8 : 109-111.
- GILLIER (P.), PREVOT (P.), 1960. — Fumures Minérales de l'arachide au Sénégal. *Oléagineux*, 15, 11 : 783-791.
- GILLIER (P.), SYLVESTRE (P.), 1969. — L'arachide. Maisonneuve et Larose (Paris) Edit., 292 p.
- GODEFROY (J.), 1974. — Evolution de la matière organique du sol sous l'influence du bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique. Thèse Doc. Ing. Université de Nancy, 166 p.

- GODEFROY (J.), LOSOIS (F.), 1966. — Variations saisonnières des caractéristiques physico-chimiques d'un sol volcanique au Cameroun. *Fruits*, 21, 10 : 535-545.
- GODEFROY (J.), POIGNANT (A.), MARCHAL (J.), 1971. — Premiers résultats d'un essai de chaulage en culture d'ananas sur un sol de basse Côte d'Ivoire. *Fruits*, (Paris), 26, 2 : 103-113.
- GODEFROY (J.), ROOSE (E.J.), MULLER (M.), 1975. — Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du sud de la Côte d'Ivoire. *Fruits* (Paris), 30, 4 : 223-235.
- GODEFROY (J.), TISSEAU (M.A.), LOSOIS (P.), 1972. — Evolution des propriétés agrochimiques d'un sol ferrallitique de basse Côte d'Ivoire sous culture d'ananas - Comparaison avec une jachère. *Fruits* (Paris), 27, 4 : 255-267.
- GODFREY-SAM-AGGREY (W.), 1973. — Effects of fertilizers on harvest time and yield of cowpeas (*Vigna unguiculata*) in Sierra Leone. *Exper. Agric.* (Cambridge), 9, 4 : 315-320.
- GOEDERT (W.J.), COREY (R.B.), SYERS (J.K.), 1975. — Lime effects on potassium equilibria in soils of Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil Sci.*, 120, 2 : 107-111.
- GONZALES (E.E.), WOLF (J.M.), NADERMAN (G.), SOARES (W.V.), GALRAO (E.Z.), 1976. — Relações entre tóxicos do alumínio, desenvolvimento de raízes, absorção de água e produção de milho num oxisol (latossolo vermelho escuro) do Distrito Federal. *Ciência e Cultura* (São Paulo), 28, 2 : 181-182.
- GOUNY (P.), PREVOT (P.), 1948. — Le calcium dans la nutrition minérale de l'arachide. C. R. Ac. Agric. XXXIV : 945-947.
- GRANT (C.J.), 1964. — Caractéristiques des sols liés 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.
- GUERRERO (R.M.), 1975. — Soils of the Eastern Region of Colombia in soil Management in Tropical America. C. R. du séminaire C.I.A.T. du 10-14 fév. 1974 à Cali (Colombie), édité par North Carolina State University-Raleigh U.S.A., p. 61-91.
- GUILLAUME (M.), 1962. — Possibilités techniques et économiques de la production de sucre en Côte d'Ivoire. *L'Agron. Trop.*, XVII, 7, 8 : 504-530.
- GUILLEMOT (J.), 1965. — Les variations de l'azote minéral dans le sol et la morphologie des bananes. *Fruits*, 20, 9 : 483-504.
- GUILLEMOT (J.), LACHENAUD (J.L.), DORMOY (M.), 1973. — Quelques caractéristiques de sols des zones bananières de la Martinique. *Fruits* (Paris), 28, 5 : 335-349.
- GUITTON (J.), 1974. — Les résidus de récolte du palmier à huile. in Atelier du 14 janvier 1974 sur les résidus de récolte des principales plantes cultivées en Côte d'Ivoire, doc., O.R.S.T.O.M., mimeo.
- HADDAD (G.), SEGUY (L.), 1972. — Le riz pluvial dans le Sénégal méridional. Bilan de quatre années d'expérimentation 1966-1969. *L'Agron. Tropic.*, 27, 4 : 419-461.
- HALSTED (R.L.), MACLEAN (A.J.), NIELSEN (K.F.), 1958. — Ca : Mg ratios in soil and the yield and composition of alfalfa. *Can. J. Soil Sci.*, 38, 2 : 85-93.
- HARDY (F.), 1960. — Manual de cacau. Instituto Interamericano de ciencias agrícolas, Turrialba, Costa Rica, 439 p.
- HATCHER (J.T.), BOWER (C.A.), CLARK (M.), 1967. — Absorption of boron as influenced by hydroxyaluminium and surface area. *Soil Sci.*, 104, 6 : 422-426.
- HAYLOCK (O.F.), 1956. — A method for estimating the availability of non exchangeable potassium. C.R. Intern. Cong. Soil. Sci., 13 : 403-408.
- HEATHCOTE (A.), 1971. — The effects of potassium and trace elements on yields in Northern Nigeria. O.A.U./S.T.R.C. Seminar on the environmental factors influencing the yields of cereal crops in Tropical Africa, (Dakar), 26-29 juillet 1971.
- HELYAR (K.R.), ANDERSON (A.J.), 1974. — Effects of calcium carbonate on the availability of nutrients in an acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 2 : 341-346.

- HERRERA-VASCONEZ (C.), 1972. — L'analyse des sols comme base des recommandations pour la fertilisation des bananeraies. 2^e réunion tech. F.A.O. sur production bananière, oct. 1972, Guayaquil, Equat. in *Fruits* (Paris), 1975, 29, 2: 121-125.
- HOWARD (D.D.), ADAMS (F.), 1965. — Calcium requirements for penetration of subsoil by primary cotton roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29, 5: 558-562.
- HUNSAKER (V.E.), PRATT (P.F.), 1970. — The formation of mixed magnesium aluminium hydroxides in soil materials. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 5: 813-816. The solubility of mixed magnesium aluminium hydroxides in various aqueous solution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 5: 823-825.
- HUNTER (S.A.), 1949. — Yield and composition of alfalfa as affected by variations in the calcium-magnesium ratio in soil. *Soil Sci.*, 67: 53-62.
- HUNTER (A.H.), PRATT (P.F.), 1957. — Extraction of potassium from soils by H₂ SO₄. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21: 595-598.
- I.R.A.T., 1973. — Rapport annuel 1971. *L'agron. tropic.*, 28, 4: 490.
- JACK (R.C.M.), 1961. — Nutrient imbalance in sugar-cane revealed by foliar analysis. *Trop. Agric. (Trin)*, 38, 3: 221-223.
- JACOB (A.), 1958. — Magnesium, the fifth plant nutrient. Staple Press Ltd. London England.
- JACOB (A.), VON UEXUULL (H.), 1960. — Fertilizer use - Nutrition and manuring tropical crops. Ackerbau (Hanover) Edit.
- JACQUINOT (L.), 1964. — Contribution à l'étude de la nutrition minérale du Sorgho Congossane (*Sorghum Vulgare*, var. Guineense). *Agron. Trop.*, XIX, 8-9: 669-722.
- JADIN (P.), 1972. — Etude de la fertilisation minérale des cacaoyers en Côte d'Ivoire à partir du diagnostic « sol ». *Café, Cacao, Thé* (Paris), 16, 3: 204-218.
- JAVILLIER (M.), GOUDSHAUX (S.), 1940. — Le magnésium de la chlorophylle. *Ann. Agro.*, 10: 9-14.
- JAYEBO (E.D.), MOORE (A.W.), 1964. — Soil fertility and nutrient storage in different soil-vegetation systems in a tropical rain-forest environment. *Trop. Agric. (Trin.)*, 41, 2: 129-139.
- JONES (H.T.), 1951. — Magnesium as plant nutrient. *Soils and Fertilizers*, 14: 235-236.
- JULIA (H.), 1962. — La station de Sibiti. *Oléagineux*, 17, 4: 356-360.
- JUNG (J.), 1958. — Précis de Pétrographie - Roches sédimentaires métamorphiques et éruptives. Masson et Cie (Paris) Edit., 314 p.
- KAMPRATH (E.J.), 1970. — Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34: 252-257.
- KAMPRATH (E.J.), 1972. — Soil acidity and liming. In *Soil of the humid tropics*. Edit. Nat. Acad. of science (Washington): 136-149.
- KEY (J.L.), KURTZ (L.T.), TUCKER (B.B.), 1962. — Influence of ratio of exchangeable calcium-magnesium on yield and composition of soy-beans and corn. *Soil Sci.*, 93, 4: 265-270.
- KILIAN (J.), 1964. — Etude Pédologique des Baibos de la Bemarivo. *L'Agro. Trop.*, XIX, 11: 998-1017.
- KLINGE (H.), 1972. — Biomassa y materia organica del suelo en el ecosistema de la pluviselva centro-amazonica. C.R. 4^e Congrès Latino-américain de la Science du sol (Caracas), nov. 72.
- LACHOVER (D.), 1966. — La réponse de l'arachide de bouche en culture irriguée à l'apport de produits calciques. *Oléagineux*, 21, 2: 83-89.
- LAMOUREUX (M.), 1972. — Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogénèse ferrallitique au Liban. Mémoires O.R.S.T.O.M. N° 56, 266 p.
- LASSOUDIÈRE (A.), 1973. — La culture bananière dans la zone du Nieké (Agneby) en Côte d'Ivoire. *Fruits* (Paris), 28, 3: 171-187.
- LATHAM (M.), 1971. — Rôle du facteur sol dans le développement du cotonnier en Côte d'Ivoire. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Sér. Pédologie*, 9, 1: 29-42.
- LAUDELOUT (H.), 1950. — Etude pédologique d'un essai de fumure minérale de l'Eloéis à Yangambi. Pub. I.N.E.A.C., Série scientifique, N° 47, 21 p.

- LAUDELOUT (H.), 1954. — Etude sur l'apport d'éléments minéraux résultant de l'incinération d'une jachère forestière. Conf. Interafr. Sols, (Léopoldville), 1: 383-388.
- LAUDELOUT (H.), VAN BLADEL (R.), 1967. — La jachère naturelle en région tropicale humide. Coll. fert. sols tropicaux (Tananarive), 19-25 nov. 1967, Vol. 2: 1490-1497.
- LE BUANEC (B.), 1972. — Dix ans de culture motorisée sur un bassin versant de centre Côte d'Ivoire. *L'Agro. Tropic.*, 27, 11: 1191-1211.
- LE MARE (P.H.), 1972. — Responses to triple superphosphate in Uganda soil. Rothamsted annual Report 1972.
- LENEUF (N.), 1959. — L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Thèse faculté des Sciences, Paris, 210 p., Editeur Lang-Grandemange S.A. (Paris).
- LEUTENEGGER (F.), 1956. — Changes in the ammoniac and nitrates contents of a tropical red loam as influenced by manuring and mulching during a period of one year. *E. Afric. Agric. J.*, 22: 81-87.
- LOEW (O.), 1892. — Uber die physiologischen Funktion der Kalzium und Magnesium Salze un planzer Organisms. *Flora*, 75: 368-394.
- LOMBIN (L.G.), FAYEMI (A.A.A.), 1975. — Critical level of Mg on western Nigerian soils as estimated under green-house conditions. *Agron. J.*, 67, 2: 272-275.
- LOUE (A.), 1957. — La nutrition minérale du caféier en Côte d'Ivoire. Centre de Recherches agronomiques, Bingeville, 207 p.
- LOUE (A.), 1962. — Etude des carences et déficiences en potassium, calcium et magnésium chez le caféier Robusta. Inst. café, cacao, Bull. N° 4, 48 p.
- LOW (A.J.), ARMITAGE (E.R.), 1970. — The composition of the leachate through cropped soils in lysimeters compared to that of the rain. *Plant and soils*, 33, 2: 393-411.
- LUND (Z.F.), 1970. — The effect of calcium and its relation to several cations in Soybean root growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 3: 456-459.
- MACARTNEY (J.C.), NORTHWOOD (P.J.), DAGG (M.), DAWSON (R.), 1970 — The effect of different cultivation techniques on soil moisture conservation and the establishment and yield of maize at Kongwa, central Tanzania. *Trop. Agric.*, 48, 1: 9-23.
- MALAVOLTA (E.), 1967. — Manual de Química Agrícola. Adubos e adubação. 2^e édition — Ceres editeur (São Paulo), 606 p.
- MALAVOLTA (E.), CROCOMO (O.J.), ANDRADE (R.G.), 1964. — Effect of liming on the availability of P in Cerrado soils of Brazil. Proc. 3rd Int. Conf. Peaceful Use of Atom. Energy, 15; 507-510.
- MANDRA (S.S.), 1973. — Manuring of sisal in Tanzania. A review of field trials. *Revue de la potasse* (Berne) section 27, N° 12.
- MANE (V.B.), SAVANT (N.K.), SHINGTE (A.K.), 1970. — Relationship between cation exchange capacity of roots and mineral composition of plant as influenced by age. *Plant and soil*, 33, 1; 113-119.
- MARCHAL (J.), MARTIN-PREVEL (P.), MELIN (Ph), 1972. — Le soufre et le bananier. *Fruits* (Paris), 27, 3; 167-177.
- MARTIN (D.), 1973. — Les horizons supérieurs des sols ferrallitiques sous forêt et sous savane du centre Cameroun. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, 11, 2; 155-169.
- MARTIN (J.P.), PAGE (A.L.), 1965. — Influence of high and low exchangeable Mg and Ca percentage at different degrees of base saturation on growth and chemical composition of citrus plants. *Plants and Soil*, 22, 1; 65-80.
- MARTIN (G.), 1958. — Essai de bilan des études pédologiques dans la vallée du Niari. *Nos sols* (Brazzaville), 7-8; 41-45.
- 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, miméo.

- MARTIN (G.), 1967. — L'évolution des sols sous culture. In *Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari 1949-1954*. 2^e partie, chap. II, ORSTOM, p. 131-138.
- MARTIN (G.), 1970. — Synthèse agropédologique des études ORSTOM dans la vallée du Niari en République du Congo Brazzaville. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, VIII, 1 : 63-79.
- MARTIN-PREVEL (P.), 1961. — Potassium, Calcium et Magnésium dans la nutrition de l'ananas en Guinée. II Influence sur le rendement commercialisable. *Fruits*, 16, 3 : 113-123.
- MARTIN-PREVEL (P.), DUGAIN (F.), 1962. — Potassium, Calcium et Magnésium dans la nutrition de l'ananas en Guinée. VI Le sol et l'alimentation de la plante. *Fruits*, 17, 5 : 211-227.
- MARTIN-PREVEL (P.), 1969. — Un essai « variantes systématiques » sur bananier. *Fruits* (Paris), 24, 4 : 193-215.
- MARTIN-PREVEL (P.), MONTAGUT (G.), 1966. — Les interactions dans la nutrition minérale du bananier. *Fruits* (Paris), 21, 1 : 19-36.
- MATHIEU (Ph.), MONNET (C.), 1970. — Apports chimiques par les eaux de pluie en savane et sous forêt en climat intertropical (Côte d'Ivoire). ORSTOM (Abidjan), 153 p. (miméo).
- MAZOZERA (C.), BOUYER (S.), 1971. — Potassium et Calcium labiles dans quelques types de sols tropicaux. Coll. F.A.O. - I.A.A.E., Vienne, déc. 1971.
- McINTIRE (W.H.), SHAW (W.M.), ROBINSON (B.), 1934. — The distinction between fixed magnesium and that exchangeables, four years after lysimeter incorporation of oxydes and carbonates. *Soil Sci.*, 37 : 289-303.
- McLEAN (E.O.), HEDDLESON (M.R.), BARTLETT (R.J.), HOLOWAYCHUK N.), 1958. — Aluminium in soils — I Extraction methods and magnitude in clays and Ohio soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 22, 5 : 382-387.
- MEGIE (G.H.), 1960. — Facteur structure et comportement du cotonnier sur les argiles récentes du Logone au casier Nord-Bongor. *Coton Fibr. Tropic.* XXV, 3 : 383-387.
- MELICH (A.), 1968. — Coffee nutrition and the possible use of compound fertilizers in Kenya. *Kenya Coffee*, p. 59-66.
- MEIKLEJOHN (J.), 1962. — Microbiology of the nitrogen cycle in some Ghana soils. *Emp. J. Exper. Agric.*, 30, 118 : 115-126.
- MELIN (Ph.), 1970. — Effets de forts apports minéraux sur le bananier. *Fruits* (Paris), 25, 11 : 763-766.
- MEYER (J.A.), 1959. — Fluctuations de l'azote minéral dans les sols sous cultures vivrières. III^e conférence interafricaine des sols (Dalaba), vol. I : 517-529.
- MEYER (J.A.), DUPRIEZ (G.L.), 1959. — Quantités d'azote et d'autres éléments nutritifs apportés au sol par les eaux de pluie au Congo Belge et leur intérêt agronomique. 3^e conférence interafricaine des sols (Dalaba), vol. I : 495-499.
- MIDDELBURG (H.A.), 1955. — Potassium in Tropical soils : Indonesian archipelago. Potassium Symposium, Intern. Potash. Inst. Bern, Switzerland : 221-257.
- MIKKELSEN (D.S.), FREITAS (L.M.M.), McCLUNG (A.C.), 1961. — Efeitos da calagem e adubação de algodão, milho e soja em tres solos de campo Cerrado, São Paulo, BRASIL. I.R.I. Research Institute, New-York, 29 p.
- MOHINDER SINGH (M.), 1970. — Results and discussion. Exchange reactions of potassium, magnesium and aluminium in some Malayan soils. Ph. D. dissertation, 1970, p. 45-151, Fac. of Sci., Univ. of Malaya.
- MOKWUNYE (A.U.), MELSTED (S.W.), 1972. — Magnesium forms in selected temperate and tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 5 : 762-764.
- MOKWUNYE (U.A.), MELSTED (S.W.), 1973. — Magnesium fixation and release in soils of temperate and tropical origin. *Soil Sci.* 116, 5 : 359-362.
- MOLLE (A.), 1957. — L'alimentation minérale du caféier (*Coffea canephora* Pierre). Pub. INEAC, Série scientifique N° 69, 163 p.
- MONTAGUT (G.), MARTIN-PREVEL (P.), 1965. — Besoins en engrais des bananeraies antillaises. *Fruits*, 20, 6 : 265-273.

- MONARD (P.), BOURRIER (E.), LACOMBE (J.P.), BERDUCOU (J.), 1974. — Etude de la nutrition potassique du sorgho. Incidence du remplacement du potassium par du sodium sur la teneur en cations de la feuille. *Comm. in Soils Sci. and plant analysis*, 5, 5: 443-452.
- MOREAU (B.), ROBIN (J.), 1972. — Un essai de fumure potassique et magnésienne sur bananiers à la station d'Ivoloina (Tamatave, Madagascar). *Fruits* (Paris), 27, 9: 595-602.
- MOREL (R.), QUANTIN (P.), 1964. — Les jachères et la régénération du sol en climat soudano-guinéen d'Afrique Centrale. *Agron. Trop.*, XIX, 2: 105-136.
- MOULINIER, 1962. — Contribution à l'étude agronomique des sols de Basse Côte d'Ivoire. *Inst. Café, Cacao, Bull.* N° 3, 70 p.
- MOUREAUX (C.), 1959. — L'activité microbiologique et ses variations dans l'année en divers sols des hauts plateaux malgaches. *Mémoires Inst. Sci. Madagascar*, D, IX: 121-199.
- MULLER (W.), FASTABEND (H.), 1963. — Der Einfluss der sorbierten Magnesium für die Wasserfurchassigkeit und die Lagerungsverhältnisse von Marachboden. *Mitt. Deuts. Bodenkundlichen Gesel.*, I: 195-219 .
- MUNZILLI (O.), KALCKMANN (R.E.), MUNHOZ (F.G.), 1969. — Estudo da coreção da acidez dos solos do estado do Paraná. I Determinação das curvas de neutralização em latosolos Roxo de oeste. *Rev. Esc. Agron. Veterin.* (Curitiba), 5: 25-33.
- NEUBOULD (P.), RUSSEL (R.S.), 1963. — Isotopic equilibration of calcium 45 with labile soil calcium. *Plant and Soil*, 18, 2: 239-257.
- NGO-CHANG-BANG, OLIVER (R.), FALAIS (M.), 1971. — Mise en évidence d'un cas de toxicité manganique sur sol ferrallitique d'Anketrakabe, Diego-Suarez, Madagascar. *L'Agro. Trop.*, 26, 3: 355-375.
- NG SIEW KEE, 1968. — Soil suitability for oil palms. In *Oil Palm developments in Malaysia*, Turner Edit., 1968.
- NYE (P.H.), 1961. — Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plant and soil* (The Hague), XIII, 4: 333-346.
- NYE (P.H.), 1963. — Soil analysis and the assessment of fertility in tropical soils. *J. Sci. Fd. Agric.*, 14: 277-280.
- NYE (P.H.), GREENLAND (D.J.), 1960. — The soil under shifting cultivation. Commonwealth Bureau of soils, Tech. Comm. N° 51, 156 p.
- OCHS (R.), 1968. — Principaux problèmes de la nutrition du palmier à l'huile. Colloque Inst. Intern. Potasse Abidjan, 1968, II: 420-436.
- OFORI (C.S.), 1973. — Decline in fertility status of a tropical forest ochrosol under continuous cropping. *Expl. Agric.* (Cambridge), 9, 1: 15-22.
- OLIVEIRA-MORAIS (F.I.), CABALA-ROSAND (F.P.), 1971. — Efeito dos equilíbros entre calcio, magnésio e potássio no crescimento do cacauzeiro. *Theobroma* (Itabuna-Brasil), I, 3: 21-32.
- OLIVER (R.), DAMOUR (M.), VELLY (J.), RAZAFINDRAMONJY (J.B.), 1974. — Etude de la relation pH-carence en base sur trois sols hydromorphes des hautes terres malgaches. *L'Agron. Tropic.*, 29, 1: 28-42.
- OLLAT (C.), COMBEAU (A.), 1960. — Méthode de détermination de la capacité d'échange et du pH d'un sol. Relation entre le complexe absorbant et le pH. *Sols Africains*, 5, 3: 343-380.
- OLMOS (I.L.J.), CAMARGO (M.N.), 1976. — Ocorrencia de alumínio tóxico nos solos do Brazil; sua caracterização e distribuição. *Ciencia e Cultura* (São Paulo), 28, 2: 171-180.
- OLSON, 1970. — Work of IAEA (Vienna) and F.A.O. (Roma) related to fertility of tropical soils. Committee on Tropical soils. - London 8-18 June 1970, 12 p. multigr.
- OLSON, BERGER, 1946. — Boron fixation as influenced by pH, organic matter content and other factors. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 11: 216-220, cité par Oliver et al. 1974.

- OMAR (M.A.), ELKOBIA (T.), 1966. — Some observations on the interrelationships of potassium and magnesium. *Soil Sci.* 101, 6: 437-440.
- PALMER (J.E.S.), 1958. — Soil conservation at Mokwa, Northern Nigeria. *Trop. Agric. (Trinidad)*, 35, 1: 34-40.
- PEAT (J.E.), BROWM (K.J.), 1960. — Effect of management on increasing crop yields in the Lake province of Tanganika. *East Afric. Agric. and For J.*, 26, 2: 103-108.
- PICHOT (J.), BURDIN (S.), CHAROY (J.), NABOS (J.), 1974. — L'enfouissement des pailles de mil Pennisetum dans un sol sableux dunaire. *L'Agron. Tropic.* 29, 10: 995-1005.
- PICHOT (J.), TRUONG (B.), BURDIN (S.), 1973. — Evolution du phosphore dans un sol ferrallitique soumis à différents traitements agronomiques. *L'Agron. Tropic.*, 27, 2: 131-146.
- PIERI (C.), 1974. — Premiers résultats expérimentaux sur la sensibilité de l'arachide à la toxicité aluminique. *L'Agron. Tropic.*, 29, 6-7: 685-696.
- PIERI (C.), 1976 a. — L'acidification d'un sol DIOR cultivé du Sénégal et ses conséquences agronomiques. *L'Agron. Tropic.*, 31, 3: 245-253.
- PIERI (C.), 1976 b. — L'acidification des terres de culture exondées au Sénégal. *L'Agron. Tropic.*, 31, 4: 339-368.
- PONNAMPERUMA (F.), BRADFIELD (R.), PEECH (M.), 1956. — The chemistry of submerged soils in relation to the growth of rice. VI^e Congrès de la Science du Sol (Paris), vol. C, p. 503.
- POULAIN (J.F.), 1967. — Résultats obtenus avec les engrais et les amendements calciques. Acidification des sols et Correction. Colloque fertilité des Sols Tropicaux (Tananarive), 19-25 nov. 1967, I: 469-489.
- PRATT (P.F.), PETERSON (F.F.), HOLZLEY (C.S.), 1969. — Qualitative mineralogy and chemical properties of a few soils from Sao Paulo, Brazil. *Turrialba*, 19, 4: 491-496.
- PRINCE (A.L.), ZIMMERMAN (M.), BEAR (F.E.), 1947. — The magnesium supplying power of twenty New-Jersey soils. *Soil Sci.*, 63, 1: 69-78.
- PY (Cl), 1965. — L'ananas. Maisonneuve et Larose Edit. (Paris), 298 p.
- QUANTIN (P.), 1965. — Notice explicative: carte pédologique de reconnaissance 1/50 000 des sols de Grimari. ORSTOM, 1 vol. multigr., 60 p.
- RASSEL (A.), 1957. — La culture de l'arachide sur les plateaux du Kwango. *Bull. INEAC*, VI, 5: 301-311.
- RAUMER (E. Von), 1883. — Kalk und Magnesia in der Pflanze. *Landw. Vers. Stat.* 19: 253-280.
- REEVE (N.G.), SUMNER (M.E.), 1970. — Lime requirements of Natal oxisols based on exchangeable aluminium. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 4: 595-598.
- RICE (H.B.), KAMPRATH (E.J.), 1968. — Availability of exchangeable and non exchangeable Mg sandy coastal plains. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 3: 386-388.
- RICHARDS (L.), 1974. — La fertilisation potassique en relation avec les autres facteurs de production. *Coton Fibres Trop.* (Paris), 29, 2: 183-198.
- ROBINSON (J.B.D.), CHENERY (E.M.), 1958. — Magnesium deficiency in coffee with special reference to mulching. *Emp. J. Exp. Agric.*, 26, 103: 259-273.
- ROBINSON (J.B.D.), SEMB (G.), 1968. — Advisory soil and plant analysis methods. *East Afric. Agric. and For J.*, 34, 1: 117-127.
- ROCHE (P.), DUBOIS (B.), 1959. — Mesures de ruissellement et d'érosion réalisées à Madagascar. Troisième conférence interafricaine des sols (Dalaba), vol. II: 602-614.
- ROCHE (P.), VELLY (J.), 1962. — Etude de l'évolution des éléments fertilisants apportés sur les principaux types de sols du Lac Alaotra. *L'Agro. Tropic.*, XVII, 10: 841-880.
- ROCHETTE (C.), 1959. — Etude du ruissellement et de l'érosion sur les sols noirs de la région de Bafoussam (Cameroun occidental). 3^e conférence interafricaine des sols (Dalaba), 1959, vol. II, 585-595.

- RODRIGUEZ-SILVA (F.B.), JACOMINE (P.K.), ALMEIDA (J.C.), 1973. — Aptidão agrícola dos solos do estado do Rio Grande do Norte. Boletim Técnico N° 22 D.N.P.A., Ministerio do Agricultura, Rio de Janeiro.
- ROOSE (E.), 1967 a. — Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux (Tananarive), 19-25 nov. 1967, II : 1375-1404.
- ROOSE (E.), 1967 b. — Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *L'Agron. Tropic.*, XXII, 2 ; 123-152.
- ROOSE (E.), 1970 a. — Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogénèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, 8, 4 : 469-482.
- ROOSE (E.), 1970 b. — Erosion, ruissellement et lessivage oblique sur une plantation d'héveas en basse Côte d'Ivoire. III Résultats des campagnes 1967, 1968, 1969. Rapport ORSTOM (Abidjan), 155 p. miméo.
- ROOSE (E.), 1973. — Dix années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Centre ORSTOM (Abidjan) Thèse Doc. Ing. Université d'Abidjan, 124 p. (miméo).
- ROOSE (E.), 1974. — Influence du type de plante et du niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en climat tropical humide. Soc. Hydro-technique (Paris), XIII journées de l'hydraulique : question III, Rapport 13 : 1-7.
- ROOSE (E.J.), TALINEAU (J.C.), 1973. — Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur sol sableux de basse Côte d'Ivoire. C.R. 10^e Coll. Inst. Intern. Potass. (Abidjan) : 305-320.
- ROUZAUD (H.), 1962. — La canne à sucre au Congo. *L'Agron. Tropic.*, XVII, 7-8 : 531-542.
- SAGOT (M.), BOUFFIL (F.), 1945. — Engrais et amendement sur l'arachide, 23 p. (miméo).
- SALMON (R.C.), 1963. — Magnesium relationships in soils and plants. *J. Sci. Food Agric.*, 14, 9 : 605-610.
- SANIK (J.), PERKINS (A.T.), SCHRENK (W.G.), 1952. — The effect of calcium-magnesium ratio on the solubility and availability of plant nutrients. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 16, 3 : 263.
- SATSIYATI, SAID (A.), DAHRO, 1974. — The effect of liming and manure on yield of shallot (*Allium ascalonicum* L.) and caisin (*Brassica juncea* L.). *Bulletin Penelitian Horticultura* (Indonesia), 2, 1 : 26-40.
- SCOTT (G.A.J.), 1973. — Grassland formation in a tropical rain forest climate and its effects on the soil vegetation nutrient pools and nutrient cycles. A case study in the Gran Pajonal of Eastern Peru. Thesis, University of Hawai (Geography).
- SEGALEN (P.), 1967. — Les sols de la vallée du Noun. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol.*, V, 3 : 287-349.
- SEGALEN (P.), 1973. — L'aluminium dans les sols. O.R.S.T.O.M., Série Initiat. Doc. Technique (Paris), N° 22, 281 p.
- SHELTON (J.E.), COLEMAN (N.T.), 1968. — Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 1 : 91-94.
- SHOEMAKER (H.E.), MC LEAN (E.O.), PRATT (P.F.), 1961. — Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminium. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25, 4 : 274-277.
- SHORROCKS (V.M.), 1964. — Mineral deficiencies in hevea and associated cover plants. Edit. Rubber. Res. Inst. (Kuala Lumpur - Malaysia).
- SHORROCKS (V.M.), 1965 a. — Magnesium limestone, kieserite and serpentine as magnesium fertilizers. *J. Rubber Res. Inst. Malaya*, 19, 1 : 9-16.
- SHORROCKS (V.M.), 1965 b. — Mineral nutrition, growth and nutrient cycle of hevea brasiliensis. I Growth and nutrient contents. *J. Rubber Res. Inst. Malaya*, 19, 1 : 32-47.

- SHORROCKS (V.M.), 1965 c. — Mineral nutrition, growth and nutrient cycle of *Hevea brasiliensis*. II Nutrient cycle and fertilizer requirements. *J. Rubber Res. Inst. Malaya*, 19, 1 : 48-68.
- SIBAND (P.), 1972. — Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute Casamance - Principaux résultats. *L'Agron. Tropic.*, 27, 5 : 574-591.
- SIEFFERMANN (G.), 1973. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. Mémoires O.R.S.T.O.M., N° 66, 183 p.
- SILVESTRE (P.), 1961. — Monographie des recherches conduites à Bambeï sur l'arachide. *L'Agron. Tropic.*, XVI, 6 : 617-738.
- SINGH (O.S.), SHARMA (V.K.), 1972. — Alterations in growth and metabolism of potato plants by calcium deficiency. *Plant and soil*, 36, 2 : 363-369.
- SLY (J.M.A.), TINKER (P.B.), 1962. — An Assessment of burning in the establishment of oil Palm plantations in southern Nigeria. *Tropic. Agric.*, 32, 4 : 271-280.
- SMITH (A.N.), 1962. — The effects of fertilizers, sulphur and mulch on east african tea soils. II the effect on the base status and organic matter content on the soil. *East Afric. Agric. and For J.*, 28, 1 : 16-21.
- SMITH (A.N.), 1963. — The chemical and physical characteristics of tea soils. *East Afric. Agric. and For J.*, 28, 3 : 123-125.
- SMYTH (A.J.), 1966. — The selection of soils for cacao. *Soil Bulletin*, N° 5, F.A.O. (Rome).
- SNOECK (J.), 1974. — Les résidus de culture en caféiculture et cacaoiculture. in Atelier du 14 janv. 1974 sur les résidus de récolte des principales plantes cultivées en Côte d'Ivoire - Doc. O.R.S.T.O.M. (miméo).
- SOARES (W.S.), LOBATO (E.), GONZALES (E.), NADERMAN (G.C.), 1975. — Liming soils of Brazilian Cerrado. in Soil Management in Tropical America. C.R. du Séminaire C.I.A.T., 10-14 fev. 1974, Cali - Colombie - Edité par North Carolina State University, Raleigh, N.C. U.S.A.
- SPECHT (A.W.), 1960. — Evidence for and some implications of a variation control mechanism in plant composition. *Soil Sci.*, 89, 2 : 83-91.
- SPENCER (W.F.), 1960. — Effect of heavy applications of phosphate and lime on nutrient uptake, growth, freeze injury and root distribution of grapefruit trees. *Soil Sci.*, 89, 6 : 311-321.
- STEPHENS (D.), 1967 a. — The effects of different nitrogen treatments and of potash, lime and trace elements on cotton on Buganda clay loam soil. *East Afric. Agric. and For J.*, 32, 3 : 320-325.
- STEPHENS (D.), 1967 b. — Effects of fertilizers on grazed and cut elephant grass leys at Kawanda research station (Uganda). *East Afric. Agric. and For J.*, 32, 4 : 383-392.
- STEPHENS (D.), 1967 c. — The effects of ammonium sulphate and other fertilizers and inoculation treatments on beans (*Phaseolus vulgaris*). *East Afric. Agric. and For J.*, 32, 4 : 411-417.
- STEPHENS (D.), 1969. — The effects of fertilizers, manure and trace elements in continuous cropping rotations in Southern and Western Uganda. *East Afric. Agric. and For J.*, 34, 4 : 401-417.
- STOOPS (G.), 1964. — Application of some pedological methods to the analysis of termite mounds. Coll. Inter. U.N.E.S.C.O., (Léopoldville) 11-16, Masson Edit. (Paris), p. 379-398.
- SULLIVAN (L.J.), 1972. — Les problèmes de l'augmentation de la concentration des engrais. Oligo-éléments. *Phosphore et Agriculture*, 26, 60 : 1-15.
- SURRE (Ch.), ZILLER (R.), 1963. — Le palmier à huile. Maisonneuve et Larose (Paris) Edit., 243 p.
- SWANSON (C.L.W.), 1955. — in Handbook of food and agriculture par F.C. Blank, Reinhold Publ. Corp New-York.
- SYS (C.), 1957. — L'aménagement des sols de la région d'Elisabethville d'après leurs caractéristiques analytiques et morphologiques. *Bull. Agric. Congo Belge*, 48, 6 : 1425-1432.

- THORP (J.), 1967. — Effects of certain animal that live in soil. in Selected papers in soil formation and classification N° 1 in the selected Publi. Ser.: 191-208. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Publisher. Madison.
- TINKER (P.B.), 1964. — Studies on soil potassium. III Cation activity ratios in acid Nigerian soils. IV Equilibrium cation activity ratios and responses to potassium fertilizer in Nigerian oil palms. *J. Soil Sci.*, 15, 1: 24-41.
- TINKER (P.B.), GUNN (J.S.), 1962. — Fertilizer requirements of the oil palm in Commonwealth West Africa. Cong. Int. Horticulture, (Bruxelles), 16.
- TINKER (P.B.), SMILDE (K.W.), 1963. — Cation relationships and magnesium deficiency in the oil palm. *J.W. Afric. Inst. Oil Palm Res.*, 4, 13: 82-100.
- TINKER (P.B.), SMILDE (K.W.), 1963 b. — Dry-matter production and nutrient content of plantation oil-palm in Nigeria. *Plant and Soil*, 19, 3: 350-363.
- TOMLINSON (T.E.), 1957 a. — Relationship between Mangrove vegetation, soil texture and reaction of surface soil after empoldering saline swamps in Sierra Leone. *Trop. Agric. (Trin)*, 34, 1: 41-50.
- TOMLINSON (T.E.), 1957 b. — Changes in Sulphide containing mangrove soils on drying and their effect upon the suitability of the soil for the growth of Rice. *Emp. Jour. exper. Agric. (Oxford)*, XXV, 98: 108-118.
- TOMLINSON (T.E.), 1957 c. — Seasonal variations of the surface pH value of some rice soils of Sierra Leone. *Trop. Agric. (Trin)*, 34, 4: 287-294.
- TOURTE (R.), VIDAL (P.), JACQUINOT (L.), FAUCHE (J.), NICOU (R.), 1964. — Bilan d'une rotation quadriennale sur sole de régénération au Sénégal. *L'Agron. Tropic.*, 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), 1: 1058-1075.
- TRUOG (E.), GOATES (R.J.), GERLOFF (G.C.), BERGER (K.C.), 1947. — Magnesium-phosphorus relationships in plant nutrition. *Soil Sci.*, 63, 1: 19-25.
- TURENNE (J.F.), 1969. — Deforestation et préparation du sol par brulis. Modification des caractères physico-chimiques de l'horizon supérieur du sol. C.R. 7^e Réunion Caribbean Food Crop Society (Fort-de-France), 7: 294-304.
- TURNER (P.D.), BULL (R.A.), 1967. — Disease and disorder of the oil palm in Malaysia. *Incorp. Soc. Planters (Kuala Lumpur)*, 247 p.
- UEHARA (G.), KENG (J.), 1975. — Management implications of soil mineralogy in latin America. in Soil Management in Tropical America, p. 351-363. - C.R. du séminaire C.I.A.T. du 10-14 fév. 1974, à Cali, Colombie, Edit. par North Carolina University, Raleigh, N.Y. U.S.A.
- VAN WAMBEKE (A.), 1970 a. — Congo Kinshasa: status of soil studies. Committee on tropical soils (London), 8-12 june 1970, 13 p. multigr.
- VAN WAMBEKE (A.), 1970 b. — Soils studies in Tropical Latin America. Part II. Soil Fertility. Committee on tropical soils (London), 8-12 june 1970, 50 p. multigr.
- VEITCH (F.P.), 1904. — Comparison of methods for the estimation of soil acidity. *J. Amer. Chem. Soc.*, 26: 637-662.
- VELLY (J.), 1967. — Les exportations de quelques plantes cultivées à Madagascar comme guide de la fertilisation d'entretien. *Inst. Rech. Agron. (Madagascar)*, Doc. N° 129, 24 p. miméo.
- VELLY (J.), 1974. — Observations sur l'acidification de quelques sols à Madagascar. *L'Agron. Tropic.*, 29, 12: 1249-1262.
- VERLIERE (G.), 1967. — Effet de trois sources d'azote sur l'évolution du sol, la nutrition minérale et le rendement du Caféier. *Café, Cacao, Thé*, XI, 2: 139-156.
- VILLACHIA (H.L.), BORMENISZA (E.), ARCA (M.), 1974. — Efecto de la aplicacion de cal, fosfore y zinc en el rendimiento y la concentracion del zinc, manganese y hierro en el pasto pangola. *Turrialba*, 24, 2: 132-140.
- WAIFOR, 1960-1961. — Ninth annual Report, p. 102-103.
- WALLACE (A.), 1954. — Calcium and magnesium in citrus seeds. *Plant Physiol.*, 29, 5: 488.

- WALLACE (A.), FROLICH (E.), LUNT (O.R.), 1966. — Calcium requirements of higher plants. *Nature*, London, 209 : 634.
- WATSON (K.A.), 1964. — Fertilizers in Northern Nigeria. Current utilisation and recommendations for their use. *Sols Africains*, IX, 1 : 5-20.
- WATSON, 1969. — Water movement in two termite mounds in Rhodesia. *J. Ecol.*, T 57 : 441-451.
- WATSON (G.A.), CHIN (T.S.), WONG (P.W.), 1962. — Loss of ammonia by volatilization from surface dressings of urea on Hevea cultivation. *J. Rubb. Res. Inst.*, Malaya, 17 : 77-90.
- WAY, 1850 et 1852. — On the power of soils to absorb manure. *Journ. Roy. Agric. Soc.*, XI : 373-379; XII : 123-143.
- WEIR (G.C.), 1969. — Potassium and Magnesium Nutrition of Citrus trees. *Trop. Agric. (Trin)*, 46, 2 : 131-136.
- WESSEL (M.), 1967. — Cacao Soils of Nigeria. Segunda conferencia internacional de pesquisas em cacao (Bahia, Brésil), nov. 1967 : 417-429.
- WILLSON (K.C.), 1969. — The mineral nutrition of tea. *Revue de la Potasse*, nov. 1969, Section 27.
- WILLSTATER (R.), 1909. — Uber den Calcium und Magnesiumgehalt einiger Pflanzensamen. *Ztsch. Physiol. Chem.*, 58 : 438-439.
- YUAN (T.L.), 1974. — A double Buffer method for the determination of lime requirement of acid soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, 3 : 437-440.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN

Publications scientifiques et littéraires

TYPO - OFFSET

05002 GAP - Téléphone 51 35-23 *

Dépôt légal 126-1978

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

Direction générale :

24, rue Bayard - 75008 PARIS

Services Scientifiques Centraux :

Service des Publications :

70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY