

RÉPUBLIQUE FÉDÉRALE DU CAMEROUN

Paix -- Travail -- Patrie

FERTILITÉ ET FERTILISATION DES SOLS TROPICAUX

Cours donné à l'École Fédérale Supérieure d'Agriculture
par

M. VALLERIE

Ingénieur Agronome

Maître de Recherches de l'ORSTOM

TABLE DES MATIERES

Pages

INTRODUCTION - Notions de fertilité	1
---	---

PREMIERE PARTIE

FERTILITE NATURELLE DES SOLS TROPICAUX

CHAPITRE PREMIER : FACTEURS ET APPRECIATION DE LA FERTILITE NATURELLE..	6
I. LES DIFFERENTS FACTEURS	7
A. FACTEURS PHYSIQUES	7
Profondeur	7
Texture	9
Structure	12
B. FACTEURS PHYSICO-CHIMIQUES	17
Ions hydrogènes	17
Sels	19
Oxygène	20
C. FACTEURS CHIMIQUES	20
Bases	21
Phosphore	24
Soufre	27
Oligo-éléments	27
D. FACTEURS BIOCHIMIQUES	30
Matière organique	31
Micro-organismes	33
Macro-faune	34

II.	INTERACTIONS ENTRE LES FACTEURS	37
A.	GENERALITES	37
B.	EXEMPLES D'INTERACTIONS	39
	Alimentation potassique du caféier	39
	Eau du sol	41
	Matière organique	44
	Azote	45
III.	APPRECIATION GLOBALE DE LA FERTILITE NATURELLE	46
A.	PLANTES INDICATRICES	46
B.	PROFIL CULTURAL	49
	Système racinaire	49
	Répartition de l'eau libre	50
	Matière organique	51
C.	CLASSIFICATION DES SOLS	52
	Dénominations vernaculaires	52
	Classification pédologique	54
CHAPITRE SECOND : DEGRADATION - RESTAURATION DE LA FERTILITE NATURELLE.		58
I.	LES DIFFERENTS FACTEURS DE DEGRADATION	59
A.	FACTEURS PHYSIQUES	59
	Température	59
	Eau	60
	Vent	62
	Pression	63
	Apports de matériaux	64

B.	FACTEURS CHIMIQUES	64
	Les ions acidifiants	64
	Les sels	65
	Les éléments minéraux	65
C.	FACTEURS BIOCHIMIQUES	66
	Activité microbienne	66
	Activité faunique	66
	Excrétion racinaire	66
II.	LES CAUSES DE DEGRADATION	67
A.	LES FEUX	67
B.	DEFRICHEMENTS ET MISE EN CULTURE	68
	Action sur les propriétés physiques	69
	Action sur les propriétés chimiques.....	70
	Action sur les propriétés biochimiques	73
C.	TRAVAUX CULTURAUX	75
	Enfouissement de matière organique	75
	Travail du sol	76
	Irrigation	77
D.	APPORTS D'ELEMENTS CHIMIQUES	78
	Action sur les propriétés physiques	78
	Action sur les propriétés chimiques	79
	Action sur les propriétés biologiques	80
III.	TECHNIQUES DE RESTAURATION	82
A.	LES JACHERES	82
	Mode d'action	83
	Equilibre entre temps de jachère et de culture	85

B.	LES ROTATIONS CULTURALES	88
C.	LES RESTITUTIONS ORGANIQUES	89
D.	LUTTE ANTIEROSIVE	91

D E U X I E M E P A R T I E

A M E L I O R A T I O N D E L A F E R T I L I T E N A T U R E L L E F E R T I L I S A T I O N

CHAPITRE PREMIER :	AMELIORATION PHYSIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES	94
I.	LES AMENDEMENTS	94
A.	AMENDEMENTS TEXTURAUx	94
	Marnage	95
	Alluvionnement dirigé	95
	Labour profond	95
B.	AMENDEMENTS CALCIQUES	96
	Effets du chaulage	97
	Détermination des besoins	98
	Les différents produits	99
	Choix de l'amendement	101
	Pratique de l'amendement	101
C.	AMENDEMENTS ORGANIQUES	103
D.	AMENDEMENTS SYNTHETIQUES	106
II.	LES TRAVAUX CULTURAUX (p.m.)	106

CHAPITRE DEUXIEME : AMELIORATIONS CHIMIQUES	108
I. LOIS GENERALES DE LA FERTILISATION	109
A. PRINCIPES DE LA RESTITUTION	109
B. LOI DES FACTEURS LIMITANTS	110
C. LOI DES EXCEDENTS MOINS QUE PROPORTIONNELS	111
II. DETERMINATION DES BESOINS	113
A. ANALYSE DE LA PLANTIE	113
B. ANALYSE DU SOL	114
Utilité	115
Prélèvement des échantillons	116
Interprétation des résultats	119
C. L'EXPERIMENTATION	120
Méthodes de base	120
Pratique de l'expérimentation	125
III. LES DIFFERENTS ENGRAIS	128
A. LES ENGRAIS ORGANIQUES	128
Généralités	128
Déchets de récolte	129
Fumier artificiel	131
Fumier de ferme	133
Engrais verts	135
B. LES ENGRAIS MINERAUX	136
Engrais azotés	136
Engrais phosphatés	143
Engrais potassiques	152
Soufre et Magnésie	155
Oligo-éléments	156
Engrais composés	159

IV.	TECHNIQUE DE LA FERTILISATION	161
A.	NATURE DES APPORTS	161
B.	FORME DES APPORTS	163
	Engrais simples	163
	Engrais composés	164
C.	MODES D'APPORTS	166
	Plantes annuelles	167
	Plantes pluriannuelles	167
D.	FUMURES DES PRINCIPALES CULTURES	169
	Riz	169
	Sorgho et mils	170
	Arachide	170
	Manioc	171
	Bananier	171
	Ananas	173
	Palmier à huile	175
	Cocotier	175
	Coton	177
	Caféier	179
	Cacaoyer	180
V.	ETUDE DU MARCHÉ DES ENGRAIS EN AFRIQUE CENTRALE	181

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

La notion de fertilité est souvent très confuse dans l'esprit du praticien qui ne fait aucune différence entre fertilité, productivité ou rendement. Ces termes sont employés indifféremment alors qu'ils renferment, comme nous allons le voir des concepts très différents. (Un sol fertile peut n'être pas productif). C'est pourquoi il nous faut, au début de ce cours, bien préciser ce que nous entendons par fertilité.

NOTION DE FERTILITE ET DEFINITION

Deux idées principales doivent nous guider :

- La notion de fertilité s'applique au sol et non au milieu écologique
- La notion de fertilité renferme l'idée de "profit" pour l'homme.

Fertilité et sol.

La fertilité ne doit faire intervenir que les propriétés intrinsèques du sol sans tenir compte des conditions écologiques extérieures ou des techniques culturales intervenant sur le matériel végétal ou sur le milieu environnant (Ombrage, lutte phytosanitaire, date de semis ...). Il suffit parfois que ces facteurs extérieurs soient défectueux pour que la croissance des végétaux soit médiocre ou même nulle sans que la fertilité du sol soit en cause. (Sol désertique - Semis très tardifs ...).

Fertilité et récoltes.

La notion de fertilité renferme l'idée de "profit pour l'homme". Ce n'est pas la quantité de matière sèche produite à l'hectare qui est importante mais l'abondance de produits utiles à l'homme et destinés à être récoltés donc "exportés".

C'est ainsi que les sols sableux des régions équatoriales ou tropicales forestières portant une végétation luxuriante sont considérés comme très peu fertiles, les récoltes obtenues sur ceux-ci, après défrichements, se révélant très médiocres. De plus ces sols ne pourront être cultivés que très peu de temps. Nous reviendrons sur ce phénomène dans la suite du cours.

Puisqu'il s'agit de "production dirigée" la fertilité va dépendre plus ou moins du type de plante envisagé. En effet les exigences des différentes productions végétales, vis à vis des propriétés du sol, peuvent être variées, par exemple en ce qui concerne :

- La profondeur du sol (plantes à pivot ou à racines superficielles).
- Le profil hydrique (riz - arachide).
- La richesse chimique (ananas exigeant en K, arachide en P).

Un sol peut donc être plus ou moins fertile suivant les cultures envisagées.

Fertilité naturelle et acquise.

La fertilité n'est pas une notion statique, tout d'abord parce qu'elle intéresse un milieu biologique, le sol, et que d'autre part elle dépend des interventions humaines. C'est ainsi que la fertilité peut se dégrader, se conserver ou s'améliorer, nous parlerons alors de fertilité naturelle ou acquise.

La fertilité naturelle sera celle d'un sol en équilibre biologique avec le milieu naturel environnant : sols vierges ou sols sous jachères très anciennes.

La fertilité acquise sera celle des sols "anthropiques", c'est la fertilité naturelle modifiée, dans le sens de la dégradation ou de l'amélioration, par l'homme. Cette fertilité acquise peut disparaître d'une façon plus ou moins progressive par abandon de la mise en culture.

Définition de la fertilité

Toutes les observations précédentes nous conduisent à proposer la définition suivante :

La fertilité d'un sol est son aptitude, naturelle ou acquise, à fournir des récoltes plus ou moins abondantes et régulières d'une ou de plusieurs espèces végétales déterminées, les conditions extrinsèques au sol étant supposées favorables.

Fertilité et productivité

La notion de productivité est très différente de la précédente dans ce sens qu'elle fait intervenir le sol mais également tous les autres facteurs et en particulier le climat et les techniques culturales :

Climat : La sécheresse peut empêcher la manifestation des propriétés intrinsèques du sol : ainsi les sols des pays désertiques peuvent ne pas être productifs mais être fertiles.

Techniques culturales : Elles peuvent modifier considérablement la productivité d'un sol sans que la fertilité soit en cause : un retard dans la date de semis du coton, au Nord-Cameroun, peut entraîner une récolte insignifiante.

La productivité peut donc être définie par le rendement susceptible d'être obtenu dans des conditions de milieu données.

ETUDE DE LA FERTILITE

Il n'est pas question de vouloir mesurer la fertilité d'un sol car elle représente, comme le dit DEMOLON, "une fonction complexe de nombreuses variables dont la plupart ne sont elles mêmes ni simples ni indépendantes".

Toutefois la fertilité dépend des propriétés du sol que lui confère ses constituants physiques, chimiques et biologiques. Chacun de ces derniers constituent donc un facteur de la fertilité.

Notre méthode d'approche dans ce cours consiste à étudier séparément ces différents facteurs puis à montrer l'importance de leurs interactions dans l'appréciation de la fertilité naturelle. Nous insistons ensuite sur les facteurs et les causes de dégradation ainsi que sur les méthodes de conservation ou de régénération de cette fertilité. Enfin la deuxième partie de ce cours développe le problème de la fertilisation pris dans un sens très général, c'est-à-dire l'étude des différentes améliorations possibles des facteurs de la fertilité naturelle.

PREMIERE PARTIE

FERTILITE NATURELLE

DES SOLS TROPICAUX

CHAPITRE I

FACTEURS ET APPRECIATION DE LA
FERTILITE NATURELLE

En pays tropicaux il semble que l'importance relative des différents facteurs de la fertilité diffère sensiblement de celle reconnue dans les pays tempérés. C'est ainsi que les propriétés physiques du sol déterminent dans une large mesure la fertilité. Dans certaines régions l'action biologique (vers de terre, termites ...) revêt également une importance inconnue dans les autres pays.

Si une certaine "hierarchie" entre les facteurs se dégage il ne faut pas oublier toutefois que les interactions entre ceux-ci sont nombreuses et de ce fait compliquent singulièrement le problème.

L'étude de chacun des facteurs et de leur interactions permettront à la fin de ce chapitre de préciser la fertilité naturelle des principaux types génétiques de sols étudiés en pédologie.

I. LES DIFFÉRENTS FACTEURS

Les principaux facteurs de la fertilité naturelle peuvent être schématiquement classés en quatre grands groupes :

Physiques (profondeur, texture, structure

Physico chimique (pH, conductivité, rh)

Chimiques (éléments minéraux)

Biochimiques (matières organiques, macro et microfaune).

A. LES FACTEURS PHYSIQUES

Ces facteurs ont longtemps été méconnus ou tout du moins délaissés dans les études de fertilité au profit des caractères chimiques. Nous allons voir que les propriétés physiques du sol sont loin d'être négligeables. L'épaisseur du matériau qui constitue le sol, la texture et la structure ont un rôle, direct dans la fertilité. Nous verrons également, en étudiant par la suite les interactions, que leur influence est primordiale dans la dynamique de l'eau, élément indispensable à la croissance des végétaux.

1 - Profondeur du sol

Il est très important de déterminer l'épaisseur des horizons accessibles aux racines, en particulier dans les sols tropicaux qui possèdent fréquemment en profondeur des horizons impénétrables (cuirasse, stone line, pans ...). Lorsque ces matériaux sont proches de la surface le volume de terre exploitable par les racines est réduit. Ce fait lié à une pauvreté générale peut se révéler très néfaste surtout pour les plantes à système racinaire pivotant.

Dans les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux l'horizon gravillonnaire a plusieurs actions :

- Action mécanique directe sur la pénétration des racines. Ceci intervient surtout dans le cas des très hautes teneurs en gravillons (supérieures à 60 % en poids de terre totale).
- Diminution de la richesse chimique totale du sol.
- Action sur les rapports de l'eau et du sol.
- Diminution de la porosité totale du sol.

La meilleure façon de juger l'action des horizons gravillonnaires sera d'en mesurer les constantes physiques (porosité, perméabilité, rétention d'eau).

Le volume de terre nécessaire à la culture dépend en grande partie du profil hydrique, de l'évolution de ce profil au cours de l'année. Ainsi que du potentiel chimique du sol. On considère en général qu'il faut un minimum d'1 mètre d'épaisseur de sol accessible aux racines, toutefois un sol très riche, ayant une bonne structure et un approvisionnement en eau régulier peut être moins profond. Dans le Sud Cameroun ou au Nord-Gabon une profondeur de 60 cm de sol meuble au-dessus d'un horizon concrétionné mais non induré, suffit pour le cacaoyer alors que dans le Centre de la Côte d'Ivoire, qui a une saison sèche beaucoup plus marquée, il est nécessaire d'avoir 1,20 m à 1,50 m de sol.

Enfin les exigences des végétaux peuvent être sensiblement différentes :

Sols profonds : (1 m 50) Cacaoyer, Hévéa, Théier, Caféier, Ramie, Bananier "Gros Michel".

Sols moyens (1 m) : Cotonien, Maïs, Tabac, Sisal, Palmier à huile.

Sols peu profonds (50-70 cm) : Ananas, Arachide, Manioc.

Ces chiffres ne sont évidemment que des ordres de grandeur, ils dépendent étroitement des autres facteurs intrinsèques du sol.

2 - La texture

L'ensemble des propriétés résultant de la composition granulométrique du sol joue un rôle important dans la fertilité. Chaque groupe de particules apporte des propriétés dépendant de sa taille et de sa nature qui conditionnent en grande partie les autres facteurs (structure, eau disponible, matières organiques, richesse en éléments minéraux).

a) Propriétés des divers constituants

Les argiles : Par leur propriétés colloïdales elles confèrent au sol leur capacité pour l'eau, leur plasticité, leur cohésion leur capacité d'échange. Ces propriétés sont plus ou moins marquées suivant la nature de ces argiles (kaolinites, illites, montmorillonites ...).

Les limons : ces particules sont suffisamment fines pour permettre un colmatage des pores, elles diminuent de ce fait l'aération et la perméabilité. Par contre ces limons constituent souvent une réserve minérale qui par altération progressive est susceptible d'alimenter en bases le complexe absorbant.

Les pseudo-limons : Ils sont constitués par des particules très fines agglomérées par des liants minéraux. Ils caractérisent beaucoup de sols très riches en sesquioxyde. Ces particules sont très stables et peuvent être considérées comme des éléments structuraux. Elles ne constituent pas une réserve minérale mais, par leur porosité très grande entraînant une surface spécifique importante, elles jouent un rôle dans la capacité de rétention pour l'eau, et d'absorption ou de fixation pour certains éléments minéraux.

Les sables : ce sont des matériaux très perméables, non cohérents et à faible capacité de rétention pour l'eau sauf si ces éléments grossiers sont calcaires (capacité de rétention 20 à 25 % pour un calcaire tendre) ; suivant leur nature (fragments de roche-mère, quartz, minéraux silicatés complexes non altérés) ils constituent une réserve minérale plus ou moins importante.

b) Les différentes textures

L'appréciation de la proportion de chacune de ces catégories de particules permettra d'en déduire la qualité texturale du sol :

- Les textures très fines, riches en argile, correspondent à des sols lourds, compacts, difficilement pénétrables par les racines, souvent engorgés et asphyxiants. Nous verrons que la présence de matière organique peut corriger en partie ces défauts.

- Les textures grossières, riche en sable donnent par contre des sols légers, peu cohérents mais sujets à la sécheresse.

- Les textures moyennes, donnent des sols assez variés quant à leur propriétés physiques.

• Nous avons vu que l'humidité des sols augmente avec le taux d'éléments fins. De nombreux auteurs soulignent que les sols riches en sables offre une quantité d'eau disponible plus importante que les sols riches en argile. Si dans des régions à pluviométrie déficitaire cela peut en effet être un avantage, par contre dans les régions à pluviométrie suffisante mais mal répartie les sols argileux retiennent de fortes quantités d'eau après les pluies et permettent une alimentation hydrique des plantes pendant les périodes sèches alors que les sols sableux en sont incapables. Ces faits sont bien mis en évidence par l'extension de la végétation forestière sur sols argileux en climat limite alors que dans ces conditions les sols sableux portent de la savane.

A ce point de vue les sols de texture équilibrée (terres franches) se révéleront les plus fertiles.

- D'autre part le rapport limon/argile commande, dans une large mesure, la stabilité structurale et la compacité du sol. Plus ce rapport est grand, plus la structure est instable et plus la terre a tendance à être battante.

c) Texture et fertilité

Dans certains cas des échelles de fertilité pour des conditions bien définies ont pu être établies en se basant sur les chiffres granulométriques. Ainsi dans la vallée du fleuve du Sénégal on constate fréquemment des différences importantes de rendement du sorgho en culture de décrue, or on a pu montrer que, toutes conditions égales par ailleurs, le rendement augmente régulièrement lorsque la teneur en argile augmente ; ceci n'est plus valable lorsque la teneur dépasse 40 %. Le simple dosage de l'argile peut donc renseigner utilement sur le choix d'un terrain susceptible d'assurer de meilleurs rendements qu'un autre.

DABIN a mis en évidence une relation entre la fertilité et la teneur en gravillons dans l'horizon de moyenne profondeur en sols ferrallitiques typiques.

Profondeur cm	Refus 2 mm %	Argile %	Fertilité	Argile % Terre totale
C 60	77,5	30	Mauvaise	6,8
A				
F 50	67	43	Mauvaise	14
E				
I 50	59	33,2	Moyenne	15,5
E				
R 50	45	55,2	Moyenne à assez bonne	31
C 50	37,7	31,5	Médiocre	20,5
A				
C 50	31,47	28,8	Médiocre	20
A				
O 50	48,8	43	Médiocre	22
Y				
E 50	47	52	Moyenne	27,5
R				

Lorsque le taux d'argile atteint 30 à 40 % de la terre fine un horizon à 50 % de gravillons peut être parfaitement utilisable ; si le taux d'argile n'est que de 10 à 15 % cet horizon devient néfaste. Il est difficile de fixer des limites qui, en fait, varient avec les cultures et le climat. Le tableau ci-dessus nous montre que l'action des villons varie en fonction du type d'enracinement.

C'est ainsi que les plantes peuvent préférer certains types de texture :

Teneurs élevées en argile (70 %)	: Riz
Teneurs moyennes (40 %)	: Bananier, canne à sucre, riz en sec
Teneurs plus faibles (30 %)	: Cotonnier, Oranger, Sorgho, Tabac
Teneurs faibles (10 à 20 %)	: Ananas, Sisal, hevée, Arachide.

3 - La structure

Ce facteur physique apparaît comme le plus important. Il conditionne en effet le développement racinaire, la circulation de l'eau ainsi que les échanges gazeux indispensables aux végétaux et à la microfaune du sol.

- Développement racinaire : une structure fine grenue ou grumeleuse donne une terre meuble et favorise une bonne pénétration des racines qui peuvent alors prospecter un plus grand volume de sol (augmentation du stock d'élément minéraux et d'eau à la disposition de la plante). Ce bon ameublissement du sol favorise également le développement d'organes souterrains tels que les tubercules ou les fruit (arachides).

Dans un sol à structure dégradée en surface (sol battant) la formation d'une croûte superficielle peut empêcher la levée des semis. La présence en profondeur d'horizon compact peut limiter l'épaisseur utile de terre, les racines ne pénétrant pas cet horizon.

- Circulation de l'eau : COMBEAU et MONNIER ont montré que la perméabilité dépend bien plus de la structure que de la texture. Ils ont constaté en particulier que la vitesse de filtration est de l'ordre de 6 à 10 cm / heure dans des sols ferrallitiques pour lesquels les teneurs en éléments fins est comprise entre 60 et 80 % alors que pour un sol ferrugineux sableux (8 à 12 % d'argile) cette vitesse n'était que de 2 cm / heures.

Type de sol	A + L	K cm / h
Sols ferrallitiques rouges sur basaltes ancien (ADAMAOUA)	85 71	8,6 5,9
Sols ferrallitiques rouges sur embréchite (YAOUNDE)	80 75	6,8 6,3
Sol ferrugineux tropical sableux (SENEGAL SEFA)	(Argile 8 à 12	2,1

La présence d'horizon massif en profondeur, créant une barrière imperméable peut induire un phénomène de nappe préjudiciable à certains végétaux craignant l'engorgement (Canne à sucre, hevée, caooyer ...).

- Echanges gazeux : dans les sols à mauvaise structure le drainage est déficient il en résulte que l'aération du sol est insuffisante pour permettre par diffusion l'évacuation du gaz carbonique provenant des fermentations microbiennes. Cette accumulation de gaz carbonique liée à une diminution du taux d'oxygène libre crée un milieu asphyxiant pour les végétaux.

La structure joue donc un rôle capital dans la fertilité naturelle malheureusement il est difficile de la définir d'une façon simple et surtout de la mesurer ; on la caractérise par diverses grandeurs : porosité, poids spécifique réel et apparent, perméabilité, (voir cours de Pédologie). De plus cette structure n'est pas immuable, elle est sensible à l'action des agents atmosphériques et en particulier à l'action de l'eau. C'est ainsi qu'apparaît la notion de stabilité structurale qui définit la résistance des agrégats du sol à l'action de divers facteurs parmi lesquels l'eau joue directement ou indirectement un rôle essentiel.

Stabilité structurale

"Les relations entre la structure d'un sol ou d'une partie du sol et sa stabilité structurale ne sont pas simples. C'est ainsi qu'un sol très instable peut présenter à un moment donné une excellente structure : c'est le cas d'une terre battante convenablement préparée en vue d'un semis, par exemple. Mais si une pluie d'orage survient, la structure se dégrade rapidement, conduisant à la formation d'une croûte qui gênera considérablement la levée.

Au contraire certains sols, sous prairie permanente, présentent une structure continue et compacte car ils ont été, au cours des années, piétinés par les animaux, mais ils sont fréquemment très stables en raison d'une teneur élevée en matière organiques : si un travail du sol leur confère la structure souhaitée, ils sont capables de la conserver". (MONNIER)

Il est donc important de juger si une terre est plus ou moins stable. Les mesures de laboratoire effectuées d'après les techniques de S. HENIN (appliquées par COMBEAU aux sols tropicaux) présentent de ce fait un grand intérêt.

Rappelons la formule d'instabilité structurale

$$I_s = \frac{(A + L)}{\frac{Ag_{alcool} + Ag_{benz} + Ag_{eau}}{3} - 0,9 Sg.}$$

(voir cours de Pédologie)

Des mesures faites sur sols ferrallitiques jaunes dans la vallée du Niari montrent une bonne corrélation entre cet indice et la structure :

Caractère du sol	I _s
Sols à structure stable	0,22
Sol à structure instable	1,49
Sol à structure très instable	1,87

D'autre part les études de MOREL et QUANTIN en République Centrafricaine ont montré qu'il existe une relation générale entre la composition spécifique de la flore des jachères, l'état structural du sol et la valeur de Is. En dehors du cas particulier d'un sol peu dégradé par la culture, et encore bien structuré au départ, on observe généralement trois stades bien définis de jachère se suivant dans un ordre régulier. A ces trois stades correspondent un état structural et une valeur de Is assez nettement définie.

- 1) Fin de cycle cultural de quatre ans, sol à structure massive "mie de pain" $Is > 1,3$.
- 2) Stade de jachère à graminées superficielles, sol à structure massive "mie de pain" en voie de régénération superficielle $Is > 1,3$.
- 3) Stade de jachère à graminées érigées à enracinement moyen.

a) A *Pennisetum pedicellatum* et *P. polystachyum*, sol à structure grenue ou nuciforme en surface ; massive "mie de pain" en profondeur : $1 < Is < 1,3$.

b) A *Rottboellia*, *Pennisetum pedicellatum* et *P. polystachys* large en profondeur (polyédrique) : $0,8 < Is < 1$.

Deux autres types de jachères peuvent être également observés :

Jachère à *panicum* : Sol bien structuré sur 5 à 10 cm de profondeur et grumeleux, assez bien structuré en profondeur (nuciforme ou polyédrique fin émoussé) : $0,4 < Is < 0,8$.

Vieilles jachères : Suivant le type de jachère, à *Imperata*, *Panicum* ou *Pennisetum*, le sol a une structure stable et est suffisamment poreux et perméable sur une plus ou moins grande profondeur. La valeur de Is est toujours $< 0,4$.

Il y a donc probablement une relation d'ordre physiologique entre l'état structural du sol et le développement des graminées spontanées. Les graminées rudérales supportent des conditions physiques difficiles (sol mal aéré ou engorgé, subissant de fortes variations d'humidité et de température). Les

graminées d'ordre supérieur ont besoin d'un sol assez bien structuré, ayant une porosité suffisante, un bon drainage et une bonne rétention en eau.

Toutefois comme le disent BOYER et COMBEAU :

" Un classement de ce genre ne permet pas nécessairement d'en déduire la fertilité du sol. Il faut en effet tenir compte de la richesse chimique, de plus, l'état structural du sol et son influence sur la végétation dépendent dans une large mesure des conditions climatiques. C'est seulement dans certaines conditions d'observation correspondant à des conditions climatiques voisines que l'on peut faire apparaître des corrélations plus systématiques entre la stabilité structurale et la fertilité".

DABIN a également mis au point différents indices, dont "l'indice de structure", qui cherchent à grouper les principaux facteurs physiques ayant une influence sur la fertilité (instabilité, perméabilité, porosité, humidité à différents pF). Dans l'ensemble ces indices donnent également une idée générale sur la fertilité des sols.

Echelle des indices de structure pour différentes cultures

	Cacaoyer	B A N A N I E R		R I Z	C O T O N
		bien drainé	mal drainé		
Très bon	1.650-1.950	1.520-1.760	1.600-1.860	2.000-2.300	1.600
Bon	1.400-1.650	1.300-1.520	1.300-1.600	1.600-2.000	1.300-1.600
Moyen	1.150-1.400	1.180-1.300	1.000-1.300	1.250-1.600	1.000-1.300
Médiocre	900-1.150	860-1.180	750-1.000	900-1.200	800-1.000
Mauvais	600- 900	640- 860	450- 750	550- 900	600- 800

B. LES FACTEURS PHYSICO-CHIMIQUES

Ces facteurs (pH, rH, conductivité) n'ont pas en général d'action directe sur la fertilité, ils ne font souvent que donner des indications sur le niveau général du milieu en éléments nutritifs (pH), sur la bonne aération du sol (rH), sur la concentration générale en sels dans la solution du sol (conductivité).

1 - L'ion hydrogène (pH)

L'action des ions H^+ dans le sol est rarement une action directe, les plantes étant très plastiques à cet égard. Le pH doit être considéré surtout comme un simple indice de fertilité qui donne une indication sur les bases du complexe absorbant et sur l'activité biologique du sol (nutrification, fixation d'azote atmosphérique).

On a longtemps pensé qu'un sol avait un pH d'autant plus bas qu'il était plus désaturé et inversement. En fait ces corrélations ne sont pas toujours exactes, la nature de l'argile et des cations fixés sur le complexe joue un rôle important.

{ Montmorillonite	V = 80 %	pH = 6
{ Kaolinite	V = 40 %	pH = 6
{ Argile saturé en Ca		pH = 7
{ Argile saturé en Na		pH = 9 à 10

Par contre de nombreux auteurs ont montré que la fertilité d'un sol donné augmente lorsque son acidité diminue, à condition de rester dans certaines limites (5 et 7).

Dans le cas du riz l'augmentation du pH reste favorable jusqu'à pH = 6 ; au-dessus de cette valeur on note au contraire une action dépressive. Sur sols ferrallitiques COMBEAU note également une relation assez étroite entre la fertilité des sols pour le cotonnier et le pH.

DABIN a montré que, pour une teneur donnée en Mo et azote, pour un drainage correct, en culture irriguée, la fertilité sera d'autant plus élevée que le pH sera plus élevé (entre pH 4 et pH 6,5). Au delà cette règle dépendra surtout des cultures effectuées.

La culture irriguée du cotonnier est un exemple particulièrement net. Les chiffres suivants ont été obtenus à l'Office du Niger :

pH	Indice de rendement
5	200
5,5	500
6	1.000
6,5	1.500
7	2.000

Ces relations, obtenues pour des pH compris entre 5 et 7 tiennent au fait que pour un même sol et dans des conditions de milieu comparables le pH donne une indication valable du niveau général du sol en éléments nutritifs.

Pour des valeurs extrêmes de pH d'autres phénomènes interviennent. Une acidité excessive peut entraîner la libération ou la solubilisation de certains métaux qui, comme l'aluminium ou le manganèse, sont toxiques à partir d'une certaine dose pour les végétaux. Au contraire une forte alcalinité peut diminuer fortement l'absorption de certains éléments comme le Zn, le Fe ou le Mn.

C'est ainsi que, pour le caféier, FORESTIER pense que pour un sol argileux on peut admettre jusqu'à des valeurs de 4,5 et 4,7. En dessous le pH est trop acide surtout parce que l'assimilabilité des éléments est très perturbée. Il en est de même des pH trop élevés ; ainsi sur des sols légers où la forêt a été brûlée très fortement donnant des pH de 8,0 il est possible de voir des symptômes de mauvaise alimentation en fer.

Enfin les tableaux des valeurs optimales de pH pour les différentes plantes sont à utiliser avec prudence, ces préférences étant liées bien souvent comme nous venons de l'expliquer, non à la valeur absolue du pH mais à d'autres facteurs de croissance liés à cette valeur, dans le milieu considéré.

Tolérance approximative des principales cultures

pH inférieur à 5	:	Théier, hevée
pH voisin de 5	:	Palmier à huile, riz et coton en seo
pH de 5 à 6	:	Agrumes, bananier, cacaoyer, canne à sucre, cotonnier irrigué
pH basique	:	dattier.

2 - Les sels (conductivité)

La mesure de la conductivité permet de déceler l'existence de fortes concentrations salines dans les solutions du sol. Or nous savons que de telles concentrations peuvent devenir toxiques pour les plantes en dérèglant les phénomènes de pression osmotique des cellules.

Ce facteur toutefois ne revêt d'importance que dans les sols salins qui ont été étudiés en pédologie.

Si la concentration des solutions entraînent des troubles de croissance, la nature des sels présents peut également créer des phénomènes de toxicité spécifique : Borates et fluorures sont nocifs pour de nombreuses plantes, les chlorures le sont moins sauf pour le tabac, les sulfates le sont encore moins.

La tolérance des végétaux aux concentrations salines du sol dépend de l'espèce végétale mais également de la texture du sol comme le montre le tableau suivant.

Tolérance pour diverses cultures

P l a n t e s	Tolérance en % de terre sèche	
	Sur sol sableux	Sur sol argileux
Sensibles	Oranges	
	Citronnier	
	Haricots	1 %
	Tabac	2 %
Moyennement-résistantes	Ramie	
	Sisal	
	Ricin	
	Sorgho	2 %
	Mais	4 %
	Tomate	
	Dattier	
	Coton	
	Millet	3 %
	Riz	5 à 6 %

3 - L'oxygène : (potentiel d'oxydo-réduction)

Ce potentiel (rH_2) renseigne sur les conditions d'aération du milieu et les possibilités de formation de gley par une nappé réductrice.

Dans la pratique cette mesure est très peu employée.

C. LES FACTEURS CHIMIQUES

Dans l'état actuel des recherches les auteurs considèrent que 13 éléments chimiques sont indispensables à la croissance des végétaux : N - S - P - Cl - K - Ca - Mg - Mn - Cu - Fe - Zn - Mo - B.-

Tous ces éléments sont donc des facteurs de fertilité. Il nous faudra connaître la quantité de ces éléments du sol disponible pour la plante.

La détermination des réserves nutritives minérales du sol a fait l'objet depuis un siècle environ d'un grand nombre de travaux. Les premières expérimentations solubilisaient les éléments du sol par des acides concentrés de façon à les extraire en totalité. Rapidement on s'est aperçu que la fertilité réelle des terres ne correspondait guère aux résultats des dosages ainsi effectués : les plantes ne s'alimentent pas uniformément dans l'ensemble des réserves mais à partir de formes particulièrement labiles. De nombreuses techniques ont été mises au point depuis, pour tâcher de séparer ces fractions les plus efficaces. Bien qu'elles rendent d'incontestables services dans la détermination de la fertilité ces diverses méthodes conventionnelles et empiriques laissent subsister de larges marges d'indétermination et ne peuvent s'appliquer à tous les types de sols.

D'autre part la détermination des réserves statiques du sol doit être complétée par l'appréciation de la vitesse de diffusion de ces éléments dans la solution du sol. Cette vitesse de diffusion est commandée par le complexe absorbant qui constitue le mécanisme régulateur de la nutrition minérale. La connaissance précise des caractéristiques du complexe argilo humique est donc indispensable pour interpréter les résultats analytiques concernant la nutrition minérale.

Nous voyons donc que l'appréciation des facteurs chimiques de la fertilité sera très délicate, une étude quantitative est loin d'être suffisante il faudra tenir compte de leur assimilabilité plus au moins grande et des interactions (antagonisme ou synergisme) des éléments entre eux.

1 - Les bases

Les normes d'interprétation doivent tenir compte de la nature du complexe, de la culture envisagée et du pourcentage relatif de chacune des bases.

a) Nature du complexe

Pour une valeur donnée du complexe absorbant la fertilité du sol croît généralement avec la somme des bases échangeables.

Pour donner un exemple DABIN en première approximation, propose pour un sol contenant 20 à 30 % d'argile + limon (à capacité d'échange moyenne) et environ 2 % de M.O., les normes suivantes pour la richesse en bases (en culture irriguée, en zone tropicale sèche à semi-humide).

S	inférieure à 1,5 méq/100g	réserves faibles
1,5	< S < 3	médiocres
3	< S < 6	moyennes
6	< S < 12	Bonnes
12	< S > 24	très bonnes
	S > 24	exceptionnelles

Dans le cas des sols très sableux, très humifères ou montmorillonitiques il sera nécessaire de corriger la valeur de S en fonction de la capacité d'échange.

Pour une même teneur en base échangeables, un sol sableux peut être à un degré de saturation acceptable tandis qu'un sol argileux peut avoir son complexe absorbant saturé à moins de 20 %. FORESTIER pense qu'il est indispensable de rapporter les valeurs limites de fertilité, par exemple la teneur en potassium du sol pour une alimentation normale du caféier, à un taux d'argile et limon bien défini, sous peine d'arriver à des conclusions erronées.

Voici quelques chiffres pour caféiers proposés par FORESTIER :

(Analyses faites sur 0 - 5 cm)

		Très pauvre	Moyen Faible	Riche
A+L = 13 %	(B E	1,91	3,72	5,37
	(Ke	0,07	0,12	0,18
	(Mge	0,30	0,54	0,69
A+L = 33 %	(B E	2,47	5,95	10,76
	(Ke	0,12	0,30	0,43
	(Mge	0,36	0,85	1,22

La connaissance de la composition granulométrique d'un sol est donc très importante pour estimer sa fertilité en ce qui concerne, les bases.

b - Exigences des différentes cultures

Cultures exigeantes en potassium : Canne à sucre, Agrumes, palmier à huile, Tabac, sisal, Bananier, Ananas.

Cultures exigeantes en calcium : Sisal, Cotonnier, Arachide.

c - Equilibre des bases

L'équilibre des bases joue un rôle très important dans l'alimentation des plantes.

En général le calcium représente les 2/3 de la somme des bases le rapport Ca/Mg varie de 1 à 5 mais il est le plus souvent de l'ordre de : 2 ; le rapport Ca/K est d'environ 20.

L'équilibre observé le plus fréquemment est, en milliéquivalent Ca/Mg/K = 20/10/1 (valeurs relatives). Cet équilibre semble correspondre à une végétation normale de diverses cultures bien que d'autres équilibre soient également possibles.

Un rapport très important à considérer est le rapport Mg/K, ces deux cations étant antagonistes. Dans le cas de teneurs médiocres en l'un ou l'autre élément, un rapport Mg/K inférieur à 3 (pour le cotonnier et le bananier) indiquera une carence en magnésium alors qu'un rapport Mg/K supérieur à 25 ou 30 indiquera plutôt une carence ou un déséquilibre en potassium.

Toutefois pour ces rapports Mg/K ou Ca + Mg/K les valeurs admissibles sont plus grandes pour les sols légers que pour les sols plus lourds ces valeurs deviennent d'ailleurs à peu près constantes au-dessus de 23 % d'éléments fins.

Enfin l'ion sodium peut avoir une action très défavorable sur la fertilité des sols. Au point de vue chimique en effet il exerce un rôle antagoniste très puissant à l'égard de l'absorption des autres ions tels que Ca et K. L'ion

Na^+ ne doit pas représenter plus de 10 à 15 % de la somme des cations échangeables.

2 - Le phosphore

En ce qui concerne l'utilisation des analyses de sol pour la détermination de la fertilité les résultats de dosage du phosphore restent encore actuellement les plus difficiles à interpréter surtout dans les sols tropicaux.

Dans la plupart des sols ferrallitiques ou ferrugineux dont le pH est inférieur à 6 les résultats donnés par la méthode TRUOG sont généralement très faibles et souvent inférieur à 20 ppm de P_2O_5 même dans des sols ne réagissant pas aux engrais.

Par contre on a pu mettre en évidence une relation entre la teneur en phosphore total du sol et les rendements diverses cultures.

En première approximation BOUYER propose pour les terres à arachide du Sénégal fortement sableuses dépourvues de calcaire, pourvues en M.O. et légèrement acides, l'échelle de fertilité suivante :

P_2O_5 total	Rendement
ppm	relatifs
110	67
110 à 220	67 à 75
220 à 500	75 à 90
500	90

Des normes d'interprétation ont été proposées par DABIN dans les sols à riz et à coton du delta Central Nigérien et du Sénégal en culture sèche en tenant compte du rapport $\text{N total}/\text{P}_2\text{O}_5$ total.

Pour les sols à arachide du Sénégal le taux limite de P_2O_5 se trouve entre 0,1 et 0,2 ‰ pour un taux d'azote de 0,2 à 0,3 ‰, mais il faut tenir compte du fait que l'arachide se sert de l'azote fixé par voie symbiotique.

Pour les sols à coton et à riz du Niger les taux limites de phosphore se situent entre 0,15 et 0,25 ‰ pour $0,35 < N < 0,45$ ‰, $N/P_2O_5 < 2$.

MOULINIER considère que, pour le café, il faut, pour avoir un rendement correct, une teneur en $P_2O_5 > 0,5$ ‰ avec $N = 2$ ‰ ($N/P_2O_5 < 4$).

Pour essayer d'améliorer l'interprétation des résultats une méthode permettant de doser les réserves en phosphore plus ou moins retrogradées a été mise en application récemment par DABIN. Il semble que les besoins des sols en phosphore puissent être appréciés dans les sols tropicaux par la somme des différentes formes de phosphore minéral non retrogradé : phosphate d'alumine, phosphate de fer et phosphate de chaux. Les formes apparaissant les plus mobiles sont le phosphate de chaux et le phosphate d'alumine qui prend ainsi dans les sols ferrallitiques une très grande importance.

Le tableau suivant compare l'analyse de sols, réagissant ou ne réagissant pas aux engrais. On voit clairement que les différences portent sur le phosphore minéral non retrogradé. Quant au phosphore retrogradé les chiffres peuvent être équivalents ou même supérieurs dans les sols réagissants aux engrais.

Enfin signalons les travaux de BLANCHET qui, pour apprécier la fertilité, fait intervenir le phosphore "isotopiquement diluable" et sa vitesse de dilution dans la solution du sol (voir cours de Pédologie). Cette méthode appliquée aux sols tropicaux des Antilles a montré que certains de ces sols, malgré une faible concentration de phosphore en solution avait une bonne fertilité grâce à une vitesse de dilution très rapide.

ESSAIS AUX CHAMPS DANS DIVERSES STATIONS AGRICOLES DE COTE D'IVOIRE

Sols ne réagissant pas
aux engrais phosphatés

Sols réagissant
aux engrais phosphatés

	Sols ferrallitiques très lessivé de Basse Cote d'Ivoire ADIOPOULOUME			Sol de Man ferrallitique	Sols de BOUAKE faiblement ferrallitique	Sol de FERKESSEDOU- GOU ferrugineux	Sol ferralli- tique lessi- vé La Mé
Phosphore minéral non retrograde							
- phosphate d'alumine	60	67,5	70	7,5	7,5	3,75	32,5
- phosphate de fer	45	60	65	15	10	12,5	15
- Phosphate de chaux	7,5	7,5	12,5	5	3,75	3,75	10
Somme	112,5	135	147,5	27,5	21,25	20	57,5
Phosphore rétrogradé							
- phosphore organique	55	45	65	37,5	180	15	40
- phosphate de fer d'inclusion	130	150	150	100	145	85	140

Station IRHO La Mé - parcelles avec couverture de Pueraria

Station agricole de MAN - essaie factoriel NPK - fumier

Station agricole de BOUAKE - Culture stabilisée Maïs - Coton

Station agricole de FERKESSEDOUGOU - essai factoriel NPK - Maïs - Mil.

3.- Le Soufre

Cet élément indispensable à la vie des plantes provient pour une large part de la transformation par voie microbienne des réserves organiques du sol.

Le dosage du soufre n'est pas encore une analyse courante et il est difficile, à l'heure actuelle, de préciser les teneurs des différents sols tropicaux.

En pays tropicaux des carences en soufre ont été observées, en particulier sur sols ferrallitiques et ferrugineux pour des cultures de coton et d'arachide en ouverture, cette carence disparaît la deuxième année. Peut être faut il voir ici une insuffisance de l'activité biologique sur défriche.

4 - Les oligo-éléments

Les oligo-éléments sont des éléments minéraux nécessaires en petites quantités à l'alimentation des plantes. Ils présentent en général les caractéristiques suivantes :

- En leur absence les plantes ne peuvent pas se développer.
- Chacun d'entre eux à un rôle spécifique dans la nutrition
- Leur action est une action directe.

Les sept oligo-éléments reconnus actuellement en physiologie végétale sont :

- Le fer
- Le Manganèse
- Le Zinc
- Le cuivre
- Le Bore
- Le Bore
- Le Molybdène
- Le Chlore.

Il n'est pas exclu que cette liste puisse être à l'avenir augmentée d'autres éléments grâce aux micro-méthodes mises au point ces dernières années.

D'autre part il faut remarquer que du point de vue agronomique certains éléments sans être indispensables à la vie des plantes peuvent être utiles, notamment :

- l'Aluminium
- le Silicium
- le Lithium
- L'Iode
- le Vanadium
- le Tungstène.

Enfin deux autres éléments présentent un intérêt au point de vue nutrition animale : le cobalt et l'iode.

Fe Il est nécessaire en petite quantité et certaines plantes sont sensibles à sa carence (riz, ananas, oranger, citronnier).

Tous les sols renferment beaucoup de fer et les phénomènes de carence ne sont en général pas dus à l'absence de cet élément dans le sol mais soit à son état peu assimilable (ferrique) soit à l'action de métaux antagonistes tel que le Mn, ceci est particulièrement vrai dans les sols tropicaux pour la canne à sucre et l'ananas qui demandent un juste équilibre entre ces deux éléments.

Mn Presque tous les sols contiennent 1 à 2 % de Mn mais cet élément n'est assimilable que sous forme d'ion manganoux. Toutes les conditions du sol qui favorise une oxydation, peuvent entraîner des phénomènes de carence.

La détermination de pH et mieux du Rh peut servir à prévoir une toxicité ou une carence manganique.

Zn Cet élément, fortement retenu par la matière organique, se trouve en très faibles quantités dans les sols. Des phénomènes de carences se manifestent surtout chez les arbres fruitiers, il est également nécessaire à la formation normale des graines.

Cu Sa teneur est très variable dans les sols (3 à 100 ppm) dont une partie seulement est assimilable (0,5 à 0,7 ppm). Le cuivre est fortement immobilisé par la matière organique, si la minéralisation de celle-ci est très lente (humus brut) une carence peut se révéler.

On trouve cet élément en quantité minime dans toutes les plantes supérieures. Entre autre il stimule la formation du latex chez l'Hévéa.

Mo Il est nécessaire pour la formation des nodules des légumineuses mais d'autres plantes en ont également besoin. D'autre part les microorganismes fixateurs d'azote libre (*Azotobacter*, *Clostridium*) requiert du Mo.

Le sol contient généralement moins d'1 ppm de Mo mais sa teneur peut exceptionnellement atteindre 100 ppm. Son assimilabilité est accrue en milieu alcalin. Des carences peuvent se produire en sols très acides.

Co Il est douteux que le cobalt soit un élément vraiment nécessaire à la plante. On sait seulement qu'il est indispensable à la formation des nodosités des légumineuses. Il est également important en physiologie animale.

Le cobalt se trouve dans la partie colloïdale du sol, la carence se manifeste donc surtout en sol sableux ou / et pauvre en humus.

Teneurs en oligo-éléments dans différents types de sol
Madagascar (HERVIEU - NALOVIC)

Profil	Nombre d'échantillon	Co			N			Cu			Zn		
		Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy
1	3	3	21	14	19	178	116	28	71	17	45	102	80
2	4	8	18	13	108	146	128	53	81	66	65	125	88
3	3	19	25	22	253	345	302	94	110	101	170	218	197
4	5	12	25	17	74	115	87	52	158	99	105	358	204
5	4	5	12	8	37	81	62	38	72	55	64	107	92
6	5	15	15	19	47	63	54	32	74	46	46	160	103
7	3	15	18	17	67	105	86	50	71	61	138	145	141
8	5	14	39	31	108	235	195	90	128	105	130	202	174
9	10	18	53	34	95	250	169	57	120	87	78	206	128
10	2	1	10	7	38	80	59	29	37	33	20	42	31

1- Sol de terrasse inondable peu évolué	6- Sol ferrugineux tropical sur grès
2- Sol de levée alluviale peu évolué	7- Sol ferrallitique sur granite
3- Sol de Mangrove	8- Sol brun rouge ferrallitique humifère sur cipolin
4- Vertisol	9- Sol rouge faiblement ferrallitique lessivé sur gneiss
5- Sol ferrugineux tropical sur schistes	10- Sol calcomagnesimorphe (Rendzine noire)

D - LES FACTEURS BIOCHIMIQUES

La matière organique et les activités microbiennes ou fauniques jouent un rôle important dans la fertilité des sols. Malheureusement si les recherches sur la matière organique sont nombreuses en pays tropicaux, il n'en est pas de même sur les actions de la flore et la faune des sols.

1 - La matière organique

La matière organique exerce non seulement une influence très forte sur d'autres facteurs (voir le chapitre "interaction") mais agit également directement comme facteur de fertilité en tant que constituant du complexe absorbant, agent de chelation, source d'azote, enfin, semble-t-il, source de substances chimiques agissant sur le métabolisme de la plante.

En pays tempérés on considère qu'une accumulation de matière organique reflète de mauvaises conditions de milieu, en pays tropicaux il n'en est pas de même et sauf dans certains cas (sols tourbeux ou sols hydromorphes organiques par exemple) la fertilité croit toujours dans certaines limites, avec le taux de matière organique et d'azote total pour un rapport C/N variant de 7 à 13 - (DABIN).

Si le taux de matière organique est important les études récentes ont également montré que les différents types d'humus diffèrent par plusieurs propriétés qui influent certainement sur la fertilité (voir le cours de Pédologie). Rappelons que le pourcentage des deux types d'acides humiques (bruns et gris), le rapport acides fluviques/acides humiques et le taux d'humification caractérise les différents types de sols.

Types de sols	Horizon	Ac. H. gris % Ac. H. totaux	IAF/AH	Taux d'humification
Argile noire tropicale	A ₁	77	0,2	40
Sol ferrugineux	A ₁	66	0,6	36
Sol ferrallitique	A ₁	34	1,2	20

Ces composés humifiés beaucoup plus stables que la matière organique fraîche, se minéralisent très lentement, libérant progressivement les éléments minéraux et l'azote. De plus ces composés jouent un rôle fondamental par leur propriétés colloïdales (voir cours de pédologie). Il semble donc que les déterminations du taux d'humification et des différents types d'humus doivent être un outil essentiel pour l'agronome ; actuellement ces analyses n'en sont encore qu'au stade de recherche et dans la pratique on dose surtout la matière organique totale, et l'azote.

Relation avec le complexe absorbant

La matière organique exerce une action favorable par sa forte capacité d'échange qui entraîne un stockage important d'éléments minéraux soustraits de ce fait au lessivage. Ceci est d'autant plus important que la pluviométrie est plus forte et que les éléments argileux du complexe de la plupart des sols tropicaux ont une capacité d'échange faible.

Kaolinite	:	20 meq
Montmorillonite	:	100 meq
Ac. humiques	:	300 meq.

De plus il semble que les éléments fixés par la matière organique soient beaucoup plus mobiles que ceux fixés par les argiles, donc l'alimentation des plantes s'en trouve facilitée.

Agent de chelation

Par le processus de chelation les anions organiques donnent naissance à des composés stables par combinaison avec certains cations tels que Ca, Fe, Zn, Mn Ce processus peut influencer la nutrition végétale en particulier en préservant certains éléments d'une insolubilisation (Fe, Mn, P ...).

Source d'azote

La matière organique constitue la seule source importante d'azote et de ce fait joue un rôle considérable comme facteur de la fertilité naturelle.

Rappelons que la richesse en azote total ne peut être un indice de fertilité car celle-ci peut provenir d'une mauvaise minéralisation. L'étude de l'évolution de la matière organique dans le temps est indispensable pour se rendre compte de la quantité d'azote disponible pour les plantes. (Revoir le cours de Pédologie). Cette libération d'azote dépend en grande partie de l'activité microbienne.

Facteur de croissance

L'humus stimule l'activité des végétaux par une action rhizogène, une action sur la respiration, sur la teneur en glucides et sur l'absorption et l'utilisation des éléments minéraux (BLANCHET 1958).

2 - Les microorganismes

Tous les sols renferment un très grand nombre de microorganismes divers (bactéries, champignons, algues, phages ...) qui jouent un rôle important dans la transformation des éléments organiques ou minéraux du sol. Leur action est tantôt favorable, tantôt dévorable aux cultures.

- La dégradation des débris végétaux, l'humification puis la minéralisation sont les phénomènes les plus étudiés jusqu'à présent (revoir le cycle du carbone et de l'azote). Ces phénomènes sont sous la dépendance, rappelons le, de bactéries et de champignons. Ces microorganismes participent à la fois aux processus de décomposition mais également aux processus de synthèse, l'intensité de chacun des phénomènes variant suivant les conditions de milieu. Ainsi la libération d'azote et d'éléments minéraux utiles aux plantes, aussi bien que le stockage ralentissant l'épuisement des sols dépend en grande partie de la vie microbienne.
- Le phénomène de fixation, symbiotique ou non, d'azote atmosphérique par les microorganismes intervient également comme source d'azote pour les plantes.
- Certains champignons peuvent être pathogènes, d'autres comme les micro-rhizes, vivant en association étroite avec le système racinaire de certains végétaux, favorisent la nutrition minérale.
- Certaines bactéries et lichens produisent de nombreux chélates qui agissent sur la solubilisation des substances minérales du sol.

- Des algues microscopiques sont capables d'effectuer la synthèse de matières organiques à partir des éléments minéraux en utilisant comme source d'énergie les radiations solaires.
- Les bactériophages en lysant les bacilles responsables de la fixation symbiotique d'azote chez les légumineuses peuvent créer une véritable "maladie du sol".

Toutes ces actions sont très complexes et sont encore imparfaitement connues. Toutefois plusieurs méthodes d'études permettent d'apprécier l'importance et la qualité des phénomènes microbiologiques : numération des germes, activité globale, études séparées des microorganismes, mesures de l'intensité d'un phénomène biologique donné. C'est ainsi que BACHELIER a montré, dans des sols ferrallitiques, que le "potentiel d'activité des sols" est en relation étroite avec le carbone, le pH et la stabilité structurale de ces sols. Egalement DOMMERGUES pense qu'il est possible d'envisager l'établissement d'une classification des formations forestières tropicales basé sur la biologie de leurs sols : la forêt tropicale sèche se distingue de la forêt tropicale dense humide par un pouvoir nitrificateur élevé, par une cellulolyse plus active et un taux de carbone et de saccharose beaucoup plus élevé.

3 - La faune du sol

BACHELIER (1963) a fait une importante mise au point de cette question. Nous reprendrons ici quelques unes de ces conclusions.

Selon les types de sol la faune a un rôle plus au moins important depuis les sols hydromorphes à vie microbiologique réduite aux "sols fauniques" comme les sols "à vers de terre" (Nord Cameroun) ou "à termites" (région de BERTOUA).

Cette action de la faune revêt plusieurs aspects (physique, chimique, pathologique).

a) Action physique

La faune agit d'abord directement sur la physique des sols par l'activité fouisseuse qui se traduit dans les sols à la fois par la création de galeries et par des transports de matériaux.

Les galeries auront tendance à se remplir de terre humifère entraînée par les eaux et constitueront des voies préférentielles de pénétration pour les racines. De nombreux animaux saprophages, s'attaquant aux racines plus ou moins décomposées, laissent dans le sol des chenaux fertilisés par leur déjections et là aussi d'autres racines pourront emprunter ces chenaux.

Les transports de matériau pourront avoir une influence importante sur les propriétés physiques des sols (texture, structure, porosité, résistance à l'érosion ...).

Les vers de terre contribuent à la structure grumeleuse de surface, leurs rejets sont en général plus limoneux ou argileux que le sol lui-même. La stabilité structurale est plus grande avec des agrégats de taille plus importante. Cette activité biologique accroît également grandement la porosité qui peut passer de 30 à 60 %.

Les termites pour leur part effectuent parfois des remontées spectaculaires de matériau sous forme de termitières soit épigées soit hypogées. Ces édifices sont beaucoup moins perméables que le sol lui-même car ces organismes fabriquent un véritable "béton" pour leur construction à partir d'un ciment argileux "chargé" avec des matériaux inertes (grains de quartz, pseudosables) en proportions variables. Ces éléments proviennent le plus souvent des horizons profonds du sol. Enfin, ayant besoin d'une atmosphère humide pour vivre, les termites sont amenés à humidifier constamment l'intérieur de leurs termitières qui s'avèrent ainsi beaucoup plus humides que les sols environnants.

b) Action chimique

La faune du fait même de son métabolisme, des transports de sols effectués et de son action sur la dégradation des matières végétales contribue également à constituer une réserve d'azote organique importante mobilisable à leur mort. La faune possède également des enzymes ou diastases spécifiques.

Les termites poussent très loin la dégradation des matières organiques et les teneurs en C et N sont généralement plus faibles dans les matériaux de termitières que dans les sols voisins. De plus on note un accroissement de la teneur en éléments fins ainsi que de la teneur en bases de sorte que la capacité d'échange est plus élevée mais également le taux de saturation du complexe. Corrélativement le pH du sol tend à se rapprocher de la neutralité.

Les vers de terre, à l'inverse des termites favorisent les processus d'humification mélangeant intimement la matière organique à la partie minérale du sol. Les rejets de ces organismes sont de textures plus fine et de nature plus humique que le sol lui-même, ceci explique l'accroissement observé de la capacité d'échange. D'autre part par passage à travers le tube digestif des vers certains éléments minéraux peuvent subir une altération qui peuvent libérer des éléments solubles ou échangeables, c'est ainsi que les "rejets" sont généralement plus riches en sels solubles et en certains minéraux échangeables (Ca, K, Mg, P). Les vers sont également capables de rendre assimilables pour les plantes de très nombreux oligo-éléments.

c) Action pathologiques

Certains organismes de la faune peuvent être nuisibles. En particulier de nombreuses "fatigues du sol" sont souvent dues à l'action de certains nématodes. Ces derniers attaquent les racines des plantes provoquant des phénomènes de pourriture entraînant la mort des racines. Ces nématodes peuvent encore agir comme introducteurs d'autres agents pathogènes (champignons, bactéries et même virus). Dans le Sud Ouest de Madagascar les attaques de nématodes semblent pouvoir faciliter la pénétration de différents fusariums chez le cotonnier.

II. INTERACTION ENTRE LES FACTEURS

A. GENERALITES

La fertilité naturelle est donc sous la dépendance de nombreux facteurs favorables ou défavorables. L'étude séparée de ceux-ci conduit malheureusement souvent à une appréciation insuffisante. Il faut, pour compléter nos données, tenir compte des nombreuses interactions de ces facteurs.

- Pour une même structure un sol sera d'autant plus fertile qu'il sera de texture plus fine, inversement pour une même texture il sera d'autant plus fertile qu'il sera plus structuré donc plus meuble. Encore faut-il bien voir que ceci n'est pas exact pour les sols sableux qui sont d'autant plus pauvre que la texture est plus grossière pour une même nature de matériau.
- Pour un même taux de matière organique un sol sera d'autant plus riche qu'il sera moins argileux.

Ceci est également vrai pour la somme des bases échangeables à condition bien entendu que la nature et l'équilibre des bases soient favorables.

- Pour une même richesse en bases un sol sera d'autant plus fertile qu'il sera plus meuble et plus profond permettant une meilleure prospection du sol par les racines.

Enfin une incertitude subsiste à savoir celle due aux variations saisonnières de ces facteurs. En particulier dans les pays tropicaux le climat agit avec une intensité et une amplitude très forte, entraînant une rapidité d'évolution, aussi bien des facteurs physiques que chimiques, beaucoup plus marquée que dans les pays tempérés.

- Pour la structure des résultats particulièrement intéressants ont été obtenus en R.C.A. par A. COMBEAU et P. QUANTIN à partir d'une expérience qui s'est prolongée sur 9 ans. Sur un type de sol rouge faiblement ferrallitique partagé en 8 parcelles, des échantillons ont été prélevés chaque mois. On constate une variation de Is en cours d'année. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'indice moyen est élevé. L'amplitude de la variation saisonnière est de l'ordre de 50 à 60 % de la valeur moyenne. Les valeurs les plus élevées se situent pendant les mois les plus pluvieux ; les valeurs les plus faibles en saison sèche. Il est donc important, lorsque l'on mesure cet indice, de préciser les conditions atmosphériques à l'époque des prélèvements.

- D'après MOULINIER, en Côte d'Ivoire, dans un sol très sableux, les variations des teneurs en humus, carbone et azote ont été étudiées en fonction des précipitations. Ces variations sont importantes et assez rapides aux changements de saison. Un appauvrissement sensible est noté au début des pluies. La restauration de la fertilité ne se produit que durant la deuxième moitié de la saison des pluies.

- Au Tchad, MARIUS, sur des sols proches de la neutralité, montre que l'amplitude de la variation saisonnière de pH est de une à deux unités. La variation en cours d'année est caractérisée en général par un maximum en saison des pluies et minimum en saison sèche. (Dans les pays tempérés l'amplitude de la variation du pH est d'environ 0,5 unité pH avec une général un maximum en hiver et un minimum en été).

Il paraît donc important de connaître toutes ces variations pour préciser la valeur des résultats analytiques.

Ces quelques interactions nous montrent combien le problème est complexe et la difficulté de se faire une image précise du résultat final.

B. EXEMPLES D'INTERACTION

† - Alimentation potassique

De nombreux travaux font ressortir qu'il n'existe pas de bonne corrélation entre le taux de potassium échangeable et la nutrition potassique des végétaux. Il faut tenir compte de nombreux autres facteurs : nature de l'argile, texture du sol, rapport K/S, taux de sodium, quantité d'eau disponible ...

Nous reprendrons ici une étude FORESTIER (1968) qui à cet égard nous semble très significative.

Ces études, sous culture caféière, ont porté sur des sols rouges ferrallitiques bien drainés et, pour l'influence de l'eau, sur des sols à caractère hydromorphique. Tous ces sols se trouvent sous même climat.

Influence de la texture

Pour une nutrition potassique excellente en fonction du pourcentage d'éléments fins, les normes suivantes sont proposées.

Ke meq/100 g.	A + L %
0,10	10
0,18	30
0,40	55
0,65	85

Plus le sol est riche en éléments fins, plus son taux de potassium échangeable doit être élevé, toutefois il existe des exceptions.

Influence du rapport K/S

La proportion relative du potassium par rapport à la somme des bases va accroître ou diminuer la nutrition potassique.

" On peut ainsi montrer qu'un taux normal de nutrition potassique (2,08 %) du caféier dans la zone où l'on devait avoir une nutrition insuffisante estimée à 1,70 % est provoquée par une teneur en potassium échangeable anormalement élevée par rapport aux autres cations échangeables (14,1 % de la somme des bases échangeables). Il semble que les deux effets jouant sur la nutrition potassique du caféier puissent s'additionner algébriquement".

Rapport K/S et nutrition potassique

K / S		Variations relatives % /100 g de MS	
2 %		- 0,30	
2,1	2,5	- 0,15	0,25
2,5	11	0	
11	13	+ 0,20	
13	17	+ 0,25	0,30

Taux de sodium

En présence de sodium le milieu extérieur doit contenir relativement plus de potassium pour conserver une nutrition optimum du caféier. (MOLLE).

" Il semble que pour un taux de sodium échangeable supérieur à 1 meq/100 g de terre, le caféier présente des symptômes de mauvaise nutrition. Lorsque le pourcentage de sodium dans la somme des bases échangeables dépasse 9 %, et peut être 8 % dans les sols sableux, il apparaît que la nutrition potassique est perturbée, le plus souvent entravée, et d'autant plus que le sol est plus sableux".
(FORESTIER 1968).

Eau disponible et K

"Dans tous les cas où il y a mauvais drainage, ou une nappe phréatique trop proche de la surface du sol, le taux de potassium de la feuille de caféier est plus faible que ne le laisse prévoir la relation générale entre le potassium échangeable du sol et le potassium de la feuille ... Cette faible disponibilité du potassium pour les plantes cultivées dans les sols humides avec conditions d'anaérobiose est connue. Ceci serait dû au manque d'oxygène et aux concentrations élevées et toxiques en gaz carbonique". FORESTIER 1968).

Inversement les ions potassiques dans les sol facilitent l'absorption de l'eau tout en diminuant l'évapotranspiration. Le potassium rend donc meilleure la balance hydrique de la plante. Cette épargne d'eau par le potassium se remarque dans les sols secs (coton au Nord Cameroun).

Cet exemple montre à quel point les différents facteurs sont dépendants les uns des autres et qu'il faut être très prudent dans l'estimation de la fertilité naturelle des sols.

2 - L'eau

L'eau est le principal facteur de croissance des végétaux ; elle constitue la majeure partie du poids des plantes et véhicule les substances nutritives indispensables (solution du sol). Elle est également indispensable à la vie microbiologique des sols.

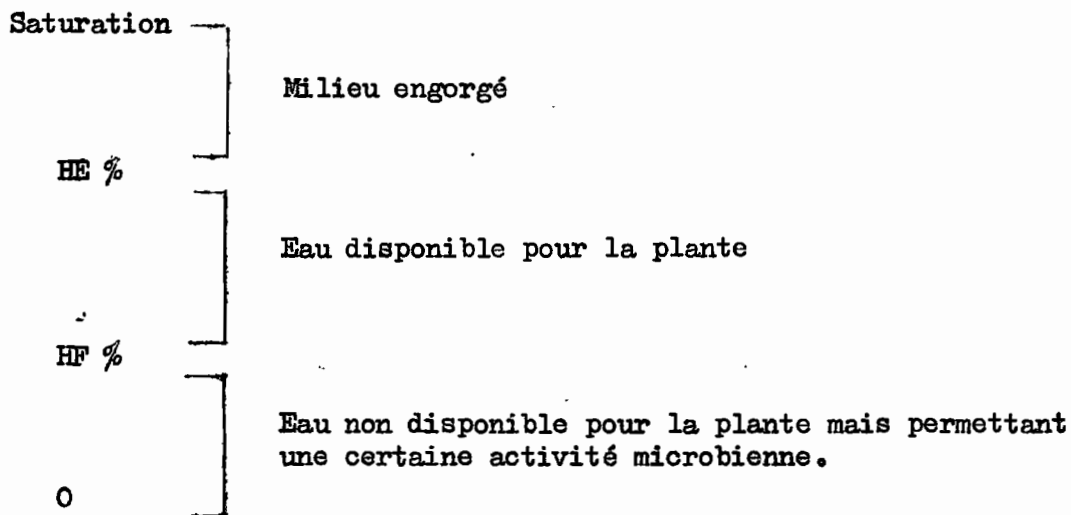
Continuellement soumis au phénomène d'évapotranspiration les végétaux demandent un approvisionnement en eau permanent plus ou moins important suivant les conditions écologiques. C'est ainsi que dans des pays pluvieux le facteur eau peut parfois devenir facteur limitant d'autant plus qu'il existe une compétition pour l'eau entre le sol et la plante, cette notion étant essentielle au point de vue fertilité.

Au Bas Congo, pour une pluie annuelle de 1500 mm et une évaporation de 800 mm. il reste 660 mm d'eau dans le sol. Supposons une eau capillaire du sol égale à 20 % et un cacaoyer dont l'enracinement va jusqu'à 2 m. Par m² de surface on a environ 3 000 Kg de sol correspondant à 600 Kg d'eau. Ceci représente juste les besoins de la plante. Dans beaucoup d'endroits il n'y a que 1 100 à 1 300 mm de pluie par an ; dans ce cas le terrain est trop sec ... (BAEYENS).

Dans les pays sahélo soudanien l'existence d'une saison sèche marquée constitue un facteur limitant de la fertilité naturelle par ralentissement ou même arrêt de la vie du sol et de la plante.

Dans les cas limites la pluviométrie peut être insuffisante, le faible stock d'eau constitué dans le sol étant retenu énergiquement par le complexe.

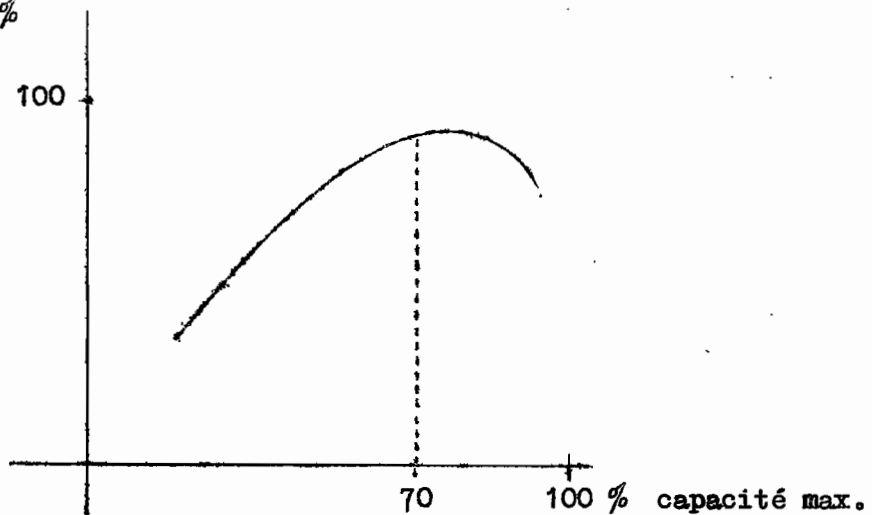
Cette compétition du sol et de la plante pour l'eau explique que les mesures d'humidité du sol doivent être confrontées avec d'autres caractéristiques (capacité et énergie de rétention du sol, pouvoir d'absorption de la plante) qui dépendent de tous les facteurs physiques étudiés précédemment. A la notion de quantité vient s'ajouter celle de disponibilité de l'eau. Il convient en effet de savoir quelle est l'humidité du sol au-dessous de laquelle la plante ne peut plus profiter de l'eau présente. Ce taux d'humidité, pour un sol donné, est sensiblement le même pour toutes les plantes : c'est le point de flétrissement. A partir de cette valeur, la plante dispose de plus en plus d'eau au fur et à mesure que l'humidité du sol augmente jusqu'au moment toutefois où sera atteinte l'humidité équivalente, au-dessus de laquelle le milieu peut être profondément modifié au détriment de la plante. Nous pouvons donc distinguer 3 zones dans l'échelle des humidités :



En ce qui concerne le point de flétrissement permanent il est classiquement admis que pour tous les sols et toutes les plantes il correspond au pF 4,2. Si cette loi se trouve vérifiée dans une large mesure pour les pays tempérés (au moins approximativement) il semble que, pour les pays tropicaux à saison sèche marquée, un certain nombre de plantes puissent utiliser les réserves d'eau du sol jusqu'à un pF plus élevé. Ceci a été montré en particulier par BILLAZ pour l'arachide qui arrive à s'alimenter dans un sol Dior jusqu'à pF 5,5. Ceci est probablement le cas des mils, sorghos, doliques, niébés et des principales graminées et légumineuses constituant la jachère naturelle après une période de culture. Il faut noter d'ailleurs que l'augmentation du stock d'eau disponible pour les plantes due à un abaissement du point de flétrissement ne saurait être très considérable.

En ce qui concerne l'eau disponible pour la plante, théoriquement mesurée par $(HE - HF)$, HALLAIRE a montré que plus un sol s'assèche plus il est difficile aux racines d'absorber cette eau disponible. Cet effet se fait sentir, en général, lorsque l'humidité du sol atteint 70 % environ de la capacité de rétention. Nous verrons, dans l'étude de la fertilisation que ce chiffre est retenu pour les problèmes d'irrigation.

Croissance relative %



La récolte en rapport avec l'eau du sol (Mitscherlich).

Enfin la teneur optimale en eau du sol varie bien entendu avec les besoins des différentes espèces (hygrophytes, mesophiles, xerophiles).

Les plantes qui demandent le plus d'eau sont le riz, le bananier, la canne à sucre, puis l'hévéa, le cacaoyer, le théier, ensuite le palmier, la ramie, l'ananas, le cotonnier, enfin le citronnier, le sisal, l'arachide, le Mil. Certaines plantes demandent beaucoup d'eau mais craignent l'engorgement (Canne à sucre, hévéa, cacaoyer, théier). Parmi celles qui demandent moins d'eau mais qui exigent également un bon drainage il y a le cotonnier, le ricin, l'ananas.

3 - La Matière Organique

La seule considération du taux de matière organique ne permet pas de juger de la fertilité naturelle d'un sol. En effet il a été montré qu'un même taux de matière organique peut correspondre à un sol pauvre s'il est argileux ou à un sol riche s'il est sableux.

FORESTIER dans une étude sur sols ferrallitiques sous forêt et sous savane a montré que la teneur en matière organique du sol augmente parallèlement à la teneur en éléments fins. Cette relation grossière se précise nettement si on associe à la teneur en éléments fins celle en bases échangeables. C'est ainsi que l'auteur introduit l'"indice de fertilité" $\frac{S^2}{A+L}$ " (qui met en évidence le fait que pour une même somme de bases échangeables un sol est d'autant moins fertile qu'il est plus riche en éléments fins). Pour les sols de même indice la relation entre matière organique et taux d'éléments fins devient alors beaucoup plus étroite.

En conclusion l'auteur souligne que la teneur en matière organique dans les sols ferrallitiques est fonction de la richesse en base et de la teneur en éléments fins du sol.

DABIN sur sols irrigués d'Afrique Tropicale propose une échelle de fertilité faisant intervenir le taux d'azote. C'est ainsi qu'il considère les intervalles suivants (dans le cas de sols à C/N variant de 7 à 13) :

N %	Matière organiques %
0,1 à 0,25	0,17 à 0,43
0,25 à 0,45	0,43 à 0,76
0,45 à 0,8	0,76 à 1,35
0,8 à 1,5	1,35 à 2,55
1,5 à 3	2,5 à 5,1
3 à 6	5,1 à 10,1

Dans des conditions de drainage correct, et pour un pH donné, on observe en passant d'une catégorie à la catégorie supérieure un croisement net de fertilité et ceci pour de nombreuses cultures. Mais ici encore les classes de fertilité ainsi déterminées en fonction de la matière organique et de l'azote ne sont valables que pour des teneurs en éléments fins compris entre 15 et 50 %. L'auteur souligne qu'en culture irriguée l'effet sur la fertilité de la teneur en matière organique totale tend à diminuer pour des teneurs en éléments fins plus élevées et à augmenter pour des teneurs plus faibles.

L'azote.

Si la mesure de l'azote total peut servir dans l'établissement d'échelles de fertilité, d'ailleurs étroitement associée à d'autres caractéristiques du sol, il n'en reste pas moins qu'un test capital pour juger la fertilité est la mesure de la vitesse de nitrification. En effet cette mesure, effectuée à des périodes bien déterminées, intègre toutes les interactions ; les résultats dépendent non seulement de la richesse du sol en azote mais également de la valeur du pH, et de certains facteurs physiques en particulier l'humidité et l'aération du sol qui agissent d'une façon importante sur la vie microbienne.

Conclusion

Beaucoup d'autres exemples pourraient illustrer cette complexité de l'action des facteurs de la fertilité (couple N-P, antagonisme des bases, blocage de certains éléments minéraux par d'autres éléments ou au contraire solubilisation par la matière organique ...). L'étude précise de toutes ces interactions est difficile et demande beaucoup de prudence dans leur interprétation. C'est pourquoi beaucoup d'Agronomes emploie, à côté de ces études, des méthodes globales pour essayer d'apprécier la fertilité d'un sol.

III. APPRECIATION GLOBALE DE LA FERTILITE NATURELLE

Pour apprécier la fertilité, c'est-à-dire la résultante des facteurs et de leurs interactions on peut s'appuyer en particulier sur l'étude des "plantes indicatrices", le profil cultural ainsi que sur les classifications vernaculaires ou mieux pédologiques des sols envisagés.

A. LES PLANTES INDICATRICES

La nature des associations végétales, l'existence de plantes indicatrices et de plantes post-culturelles sont des éléments précieux de la prospection agropédologique. Certes les plantes réellement indicatrices sont bien moins nombreuses que l'on a voulu parfois le laisser croire, certaines espèces arrivent à s'adapter à des sols qui ne constituent pas pour elles des conditions optima.

Au Cameroun certaines plantes sont indicatrices de bonnes terres à cacaoyer, leur présence permettra de repérer les terrains convenables. Il s'agit notamment de *Aframomum Danielli* (Adjoum en nom vernaculaire) de *Desmodium* (Obôk mezene), des fromagers (*Doum-Essodom*), de *Fiens vogeliana* (Tol ou Atol).

En République Centrafricaine MOREL et QUANTIN ont montré qu'une jachère lente à s'installer et caractérisée essentiellement par des graminées rudérales telles que *Cynodon dactylon*, *Digitaria horizontalis*, *Dactyloctenium aegyptium* etc... indiquera un sol très dégradé et par suite peu fertile. Une jachère rapide à s'installer, où, dès la première ou seconde année, s'introduisent *Rottboellia exaltata*, *Panicum* ou *Penmisetum*, *purpureum*, indiquera un sol peu dégradé et assez fertile. Une jachère qui débute sur un sol bien pourvu en azote est riche en *Ageratum conyzoides*.

Imperata Cylindrica est une graminée des terres en cours de dégradation culturale excessive convenant mal aux cultures annuelles et à peu de cultures arbustives y compris celles de palmier à huile et des races héliophiles de *coffea Canephora*. Les Aleurites, le Bigaradier, le Manguier et parfois l'Hévéa s'en accommodent.

Sur les hauts-pâturages du Cameroun (Bambuttos), la fréquence de *Sporobolus pyramidalis* est l'indice d'une surcharge excessive en bétail.

Si certaines plantes indicatrices sont en même temps restauratrices (*Faidherbia albida*, *Cassia occidentalis*, Herbe à éléphant, etc.), il en est d'autres qui sont en plus nuisibles à la culture pratiquée sur la terre qu'elles ont enrichies. L'herbe à éléphant relève déjà de ce type par ses couches rhizomateuses et sa facilité de multiplication par bourgeonnement des noeuds de chaume à terre, qui favorisent la réinfestation du terrain.

Oriza Barthii est également à la fois indicatrice d'un sol dégradé (quand il envahit la culture) et d'un sol restauré (rizière naturelle florissante).

Dans les rizières naturelles du Delta Central Nigérien pullule en colonies dense l'espèce rhizomateuse vivace et plus ou moins flottante suivant la hauteur d'eau : *Oryza Barthii*. Rhizomes et chaumes accumulent d'année en année un matériel important de décomposition ralentie (sols submergés une partie de l'année, secs et sans vie pour l'autre). Ces rizières naturelles florissantes sont des emplacements de choix pour la culture du riz flottant (*O. GLABERRIMA*). Elles sont défrichées avec enlèvement des rhizomes d'*O. Barthii* et autres plantes; la culture du riz s'y pratique pendant quelques années et sera abandonné quand *O. Glaberrima* se verra envahi par *O. Barthii*. On retourne alors à une jachère longue de riz vivace jusqu'à reconstitution d'un amoncellement organique suffisant pour entamer une nouvelle série de cultures de riz.

Enfin PORTERES, sur les hauts plateaux de l'Ouest Cameroun, a observé une certaine liaison entre la végétation naturelle et la plus au moins grande fertilité des sols pour le caféier arabica.

Nature du complexe cultural édaphique	Sans ombrage	Ombragé par Albizzia melanocrapa
I.- Terres noires fertiles à cendres volcaniques et pouzzolances de défriche ou fumées, très travaillées à la houe.	Peuplement pur de Galinsoga parviflora de petite taille.	Idem (de grande taille).
II.- Terres noires semi-fertiles soit usées, soit mal travaillées ou non fumées. Terres brunes basaltiques très travaillées ou très fumées.	Peuplement 1/2 pur Commelina nudiflora avec peu de graminées et présence encore abondante de Galinsoga.	Peuplement à Galinsoga ou mixte (Galinsoga-Commelina).
Limite entre cultures très rémunératrices et peu rémunératrices du Coffea Arabica		
III.- Terres noires semi-fertiles à tuff proche de la surface du sol, travaillées et fumées. Terres brunes travaillées et fumées	Infiltration des Graminées sorobiculatum et Digitaria horizontalis dans le peuplement à Commelina.	Peuplement presque pur à Commelina
Limite de la culture économique de Coffea Arabica en culture industrielle		
IV.- Terres brunes mauvaises, latérisées difficiles à conduire mais travaillées et fumées.	Disparition définitive de Galinsoga, réduction de Commerlina, développement de la Strate à Paspalum et infiltration du Rhynchelytrum roscum	Galinsoga par taches. Commerlina encore dominant. Développement de Digitaria et infiltration de Paspalum.
Limite de la culture économique de Coffea Arabica en culture indigène		
V.- Terres granitiques ou basaltiques latérisées, sans productivité sur l'Arabica bien que travaillées et fumées.	Prairies à Rhynchelytrum roseum	Dominance de Paspalum et développement du Rh. roseum sur les plages ensoleillées ; Galinsoga est sporadique, Commerlina encore commun.
Limite de la culture économique de Aleurites ssp.		
VI.- Terres incultivables économiquement (cultures arborées ordinaires) très latérisées, très lessivées.	Prairies à grandes Panicées et Andropogonées + Imperata.	Prairies rases à Digitaria et Paspalum avec infiltration sur les plages ensoleillées de rhynchelytrum et Imperata.

B. LE PROFIL CULTURAL

Cette importante question a été étudiée d'une façon très complète par S. HENIN (1960).

L'observation des phénomènes dynamiques, reflétant une partie de la fertilité du sol, qui se déroulent au sein du profil, permet dans une certaine mesure d'apprécier l'action simultanée de plusieurs facteurs. Le développement du système racinaire, par exemple, est sous la dépendance de la texture, de la structure, de la quantité d'eau disponible, de la richesse minérale, elle même souvent liée à l'état de la matière organique. L'étude du comportement des racines, de la répartition de l'eau libre, ou de la matière organique peut fournir de précieux renseignements.

Le système racinaire

Les racines sont très sensibles dans leur état sanitaire, leur abondance, leur répartition et leur forme aux diverses conditions physiques, chimiques, ou physico chimiques du milieu.

Un chevelu abondant prospectant tous les éléments structuraux d'un sol indique des conditions physiques (texture, structure-aération ...) favorables. Au contraire un système contourné, évitant certains horizons ou certaines mottes, localisé dans les fissures, indique la présence d'éléments défavorables : structure massive (localisée ou continue), concrétions, cuirasses, mauvaise aération, milieu engorgé. Egalement la forme des racines (aplatie, en arêtes de poissons, à part coralloïde ou en fil de fer) peut être un indice d'un milieu physique plus ou moins favorable.

L'apparition de nécroses ou de manchons rouilles autour des racines peut indiquer des phénomènes intermittents d'engorgement et donc de conditions réductrices postérieures à l'installation des racines.

L'interprétation de ces observations est parfois très délicate et demande une confrontation avec l'étude de chaque facteur. Par exemple l'accumulation de racines à un niveau donné peut indiquer que celui-ci possède des propriétés très favorables ou que l'horizon sous-jacent est très défavorable.

Répartition de l'eau libre

Nous avons déjà signalé que la capacité de rétention pour l'eau, la perméabilité, la porosité étaient étroitement liés à la texture et à la structure.

En particulier le sous sol a une structure souvent plus compacte que celle du sol lui-même ceci entraîne une perméabilité beaucoup plus réduite. A la limite si cet horizon est imperméable les pluies, qui s'infiltrent aisément en surface, vont s'accumuler en profondeur et rendre le milieu asphyxiant. Les végétaux vont souffrir pendant un temps plus ou moins long d'un manque d'aération qui entrainera un ralentissement de la croissance ou même la mort du végétal. Dans certains cas seule l'observation du profil expliquera ce phénomène de dépérissement.

Il arrive que ces couches imperméables soient situées à une certaine profondeur dans le sol et qu'elles affleurent le long des pentes. La nappe d'eau qui se constitue à leur surface s'écoule alors lentement, formant ces taches d'humidité si caractéristiques qui paraissent vers le milieu des pentes et que l'on appelle mouillières. Il peut même se produire que de l'eau se trouve enfermée entre deux couches imperméables présentant un léger pendage ; l'eau se trouve alors en charge, elle imbibe la couche peu perméable formant la partie supérieure de cet ensemble et il se produit, là où elle affleure, des zones humides dont le drainage est extrêmement difficile.

L'influence de la topographie sur le profil hydrique du sol et son alimentation en eau est également importante. L'observation des profils peut renseigner sur la qualité du drainage interne ou sur la présence de nappe.

A la limite de la zone de culture possible du cacaoyer, là où la pluviométrie est à peine suffisante (1200 à 1350 mm) et la saison sèche un peu trop prolongée, les beaux cacaoyers ne se trouvent que dans les bas-fonds là où le ruisselle-

ment provoque un accroissement de l'approvisionnement en eau du sol, à condition toutefois que la nappe phréatique ne soit pas trop proche de la surface. Sur les pentes voisines, les cacaoyers peuvent se développer assez vigoureusement pendant un certain temps : il suffira d'une année particulièrement sèche pour qu'ils dépérissent, l'eau disponible n'étant plus assez abondante. Par contre dans les zones à climat humide l'alimentation en eau sera beaucoup plus forte et la position la meilleure sera sur les faibles pentes, les bas fonds étant le plus souvent engorgés par la nappe.

Matière Organique

Sous l'influence des facteurs biologiques la matière organique est plus ou moins détruite et mélangée à la matière minérale du sol. L'évolution de la matière organique et son état sont caractéristiques du milieu.

Suivant les possibilités de renouvellement de l'atmosphère du sol dans la couche où elles sont situées, ces matières organiques peuvent subir des évolutions très différentes.

- En "termes creuses", c'est-à-dire très aérées et plutôt sèches, leur décomposition est lente. On note fréquemment la présence de champignons sous forme d'un mycelium blanchâtre, qui confèrent au sol à proximité une odeur de moisi caractéristique.

- Lorsque le sol est moins caverneux et plus humide, tout en étant suffisamment aéré, la décomposition des matières organiques est normale. Les débris noircissent, deviennent visqueux, et dégagent une odeur de fumier. L'existence d'un tel type d'évolution est un indice de bonne condition physique dans le sol étudié.

- Mais il arrive aussi que pour diverses raisons l'aération soit insuffisante. (La présence d'un excès d'eau occupant toute la porosité). Dans les cas les moins graves, la fermentation qui se produit alors est comparable à celle qui intervient dans les silos de fourrages verts. Une odeur significative d'acides organiques volatils permet de décélérer ce type d'évolution. Lorsque les conditions du milieu sont extrêmes les fermentations de type anaérobie qui se développent, rendent

le sol de plus en plus réducteur ; ce dernier dégage alors une odeur prononcée et fétide d'hydrogène sulfuré ou de pomme de terre pourrie. C'est là un des signes du phénomène de gleyification, dont les conséquences peuvent être graves si des racines de la culture sont présentes au niveau où il se produit. (MONNIER)

C - CLASSIFICATION DES SOLS

Les études réalisées par de nombreux pédologues et agronomes en pays tropicaux ont permis de déterminer d'une façon approximative la fertilité naturelle des divers types de sol. La prospection pédologique, amenant à connaître la répartition de ces sols est ainsi l'un des éléments de base permettant de déterminer la meilleure utilisation agricole possible d'une région.

De tous temps d'ailleurs les agriculteurs ont classé leurs terres en fonction de leur fertilité naturelle et leur ont donné des dénominations. Actuellement les études pédologiques permettent de préciser ces données vernaculaires et d'en améliorer considérablement l'interprétation.

1. Dénominations vernaculaire

Nous prendons nos exemple dans le Nord Cameroun mais des termes locaux attachés à la fertilité des terres existent dans bien d'autres régions.

Les Hardés. Ce terme désigne des terrains incultes par suite de la compacité du sol et des mauvaises conditions hydriques. Par extension on a donné le terme de hardé aux sols argileux compact. Les arabes appellent ces terres des Nagas.

Les Lopé. Ce sont les argiles noires tropicales sur lesquelles on cultive le muskuari. Ces terres sont souvent appelés improprement karal (qui ne voudrait dire que champ de mil repiqué).

Lorsqu'ils sont très longtemps inondés ils forment des prairies naturelles appelées yaérés.

Les lopé se distinguent nettement des hardés par un retrait en saison sèche, une perméabilité plus grande du sous sol, et une plus grande richesse en matière organique.

Les Boulouwo. Ce sont des sols exondés présentant un léger retrait en saison sèche. Ils diffèrent des précédents par une compacité moindre, une structure plus fine, une porosité assez marquée. Ils conviennent à toutes sortes de culture et sont très recherchés.

Les lizagans. C'est une terre de piémont de bonne structure et de bonne texture. Elle se travaille facilement après les premières pluies et convient au mil et au coton.

Les Dande Mayo. Ce terme désigne les alluvions récentes plus ou moins argileuses qui bordent le lit des fleuves et qui sont recouvertes par les crues. Ces terres deviennent dures en saison sèche et on ne la travaille qu'après les premières pluies pour la culture de la patate sur billons. L'apport des limons par les crues confèrent à ces sols une bonne richesse chimique.

Les Yoldé. Ce sont des sols sableux. Ils sont souvent pauvres et ne portent actuellement que du mil ou de l'arachide.

Les Djarengols. Ce terme provient du mot Djarengi qui veut dire sable. On trouve ces terres soit en bordure des rivières soit en piedmont des massifs granitiques. Ils se différencient des Yoldés par un pourcentage plus fort de sable grossier. Ce sont des terres très pauvres et très sensibles à la sécheresse. On n'y cultive actuellement que l'arachide.

2 - Classification pédologique

Les sols peu évolués

Sols peu évolués d'érosion :

Sur roche acide ils sont peu épais et graveleux. Leur teneur en matière organique et en argile sont faibles. Ces sols sont cultivés seulement en sorgho et les récoltes ne seront satisfaisantes que si les pluies sont bien réparties.

Sur roche basique ils présentent également une faible épaisseur et une proportion de cailloux et graviers importante. Par contre leur teneur en matière organique et en éléments minéraux est bonne. Parfois la proximité de la roche compacte peut induire un drainage interne médiocre entraînant des phénomènes de gleyifications. Si le drainage est correct et la profondeur suffisante ces sols peuvent convenir aux cultures arbustives. Les cultures vivrières sont possibles quelques années mais amènent une dégradation rapide par érosion.

Sols d'apport

- Sur coulées basaltiques récentes ces sols sont très riches du point de vue matière organique (6 à 10 %), azote (3 à 8 %) et bases échangeables (13 à 20 méq) ; leur pH est faiblement acide (6 à 7) mais ils sont peu pourvus en argile et excessivement poreux. De ce fait ils sont plus sensibles que tout autre à la sécheresse.

Lorsque l'alimentation en eau peut être correctement assurée ces sols peuvent porter des cultures très exigeantes comme celle du bananier. Ailleurs ce sera en particulier le caféier qui permettra de tirer un bon profit de ces sols. Toutes les cultures vivrières peuvent également donner d'excellentes récoltes. Certains de ces sols reposent sur un ancien sol ferrallitique, les racines des végétaux trouvent alors en profondeur un matériau à bonne capacité de rétention pour l'eau.

- Sur alluvions les sols sont très variés tant au point de vue physique que chimique. Il est impossible de donner une idée approximative de leur fertilité.

- Sur pédiments les sols sont très sableux présentant une perméabilité très grande. Le taux de matière organique est faible : 0,5 à 0,8 %, la réaction souvent acide (6), la capacité d'échange très faible mais le degré de saturation élevé (80 à 90 %). Ces terrains nombreux dans le Nord Cameroun, peuvent être cultivés en sorgho à condition de bénéficier d'une répartition favorable des pluies.

Sols ferrugineux tropicaux

Ces sols sont caractéristiques des climats soudanais. Ils se distribuent entre les isohyètes 500 et 1200 mm, sous végétation de savane et sur roches acides. Ce sont des sols à profils A. B. C., dans lesquels le lessivage du fer et de l'argile est marqué. Il en résulte la formation en profondeur, vers 70/100 cm, d'un horizon argileux (B textural) et, sous ce dernier, de concrétions et parfois de cuirasses ferrugineuses indurées. Ces horizons profonds se colmatent en saison des pluies, freinent le drainage, provoquent dans les horizons de surface des phénomènes de réduction marqués. Par suite, l'horizon humifère est prédominant, de couleur gris - noir, à teneurs en matières organiques faibles (1 à 3 %), C/N supérieur à 10 (11 à 17). Le coefficient d'humification est élevé (20 à 40 %). La mise en culture cause des pertes rapides par minéralisation. Le complexe absorbant est à base d'argile kaolinitiques et illitiques. La capacité d'échange est peu élevée (20 à 25 meq % d'argile, 3 à 5 meq % de terre fine). Le degré de saturation est relativement haut (50 à 90 %), et les pH sont faiblement acides (6,0).

Les réserves totales peuvent être assez élevées. Mais, comme les matériaux originels sont souvent très évolués, les teneurs en minéraux altérables sont parfois extrêmement basses. Celles en P_2O_5 sont variables mais généralement faibles.

Les sols ferrugineux tropicaux sont très sensibles à l'érosion par l'eau. Leur stabilité structurale est faible.

Il résulte de ces caractéristiques que la fertilité de ces sols dépend avant tout du degré de structuration qui régit le régime hydrique et l'aération du sol. La structure, vu les conditions du milieu, est difficile à modifier par des méthodes culturales économiques (travail du sol, fumure organique).

Ces sols portent principalement des cultures d'arachides, de mil à chandelle quand ils sont sableux, sorgho, coton en milieu plus lourd ; de riz dans les positions les plus mal drainées.

Sols Ferrallitiques

Les sols ferrallitiques diffèrent considérablement des précédents. Ils se développent sous des pluviométries supérieures à 1200 mm/an, sous-forêt et sur matériaux divers. Ce sont des sols très profonds de couleur rouge ou jaune, à horizons peu différenciés. Ils sont, pour la plupart, bien drainés. Leur horizon de surface, de couleur brune, est peu épais (10 cm) ; le rapport C/N est proche de 10. La matière organique se minéralise rapidement (cycle de 2 à 3 ans).

Le complexe absorbant est à base exclusive de kaolinite. La capacité d'échange est très basse (1 meq % de terre fine), ainsi que le degré de saturation (40 % et plus souvent de l'ordre de 5 à 10 %). L'acidité est élevée (pH : 5,5). Les réserves minérales sont inexistantes. Les teneurs en P_2O_5 sont variables, mais généralement basses et peu accessibles aux plantes.

Les sols ferrallitiques supportent des cultures variées : manioc, palmier à huile, bananiers, caféier, cacaoyer, ananas, etc...

Vertisols

Ces sols de faible épaisseur (1 mètre en moyenne), se développent sous des climats variés mais toujours à saison sèche marquée ; sur des matériaux basiques à ultra-basiques, en position de drainage ralenti. Ils se caractérisent par une néoformation d'argiles montmorillonitiques. Ces argiles à fort pouvoir gonflant amènent le développement d'une structure massive, cubique, extrêmement stable.

La capacité d'échange est élevée (15 à 30 meq). Le pH est neutre à faiblement acide. Malgré la couleur foncée les teneurs en matière organique sont peu élevées (1 à 2 %).

Ces vertisols ont dans l'ensemble de bonnes qualités chimiques mais présentent de mauvaises caractéristiques physiques de drainage et de structure. Si certaines cultures comme le sorgho repiqué peuvent s'y adapter, le coton, pour donner des rendements corrects, nécessite des travaux culturaux comme le billonnage.

Certains de ces sols sont inondés en saison des pluies ce qui limite les possibilités d'utilisation : culture de décrue (sorgho repiqué) ou dans certains cas riziculture irriguée. Leur principal défaut est le manque assez général d'azote.

Les sols bruns eutrophes

Ils présentent un certain nombre de facteurs favorables : perméables, bien structurés, riche en matière organique et en bases échangeables, aux réserves importantes. Ils constituent d'excellents sols convenant à toutes les cultures (bananiers, caféiers, cacaoyers, et bien entendu aux cultures vivrières diverses).

C H A P I T R E I I

DEGRADATION - RESTAURATION DE LA FERTILITE NATURELLE

INTRODUCTION

Dans un milieu écologique naturel, c'est-à-dire parfaitement en équilibre, la "fertilité naturelle" d'un sol n'est sujette qu'à de très faibles variations. Ainsi la forêt équatoriale primaire se maintient en "circuit ferme" depuis des temps très reculés. Malheureusement cet équilibre réel est instable et toutes modifications apportées au milieu aura des répercussions plus ou moins importantes dans le sens d'une dégradation ou d'une amélioration de la fertilité naturelle.

Il faut entendre par dégradation tout appauvrissement ou diminution de la fertilité naturelle du sol. Ce terme concerne aussi bien les aspects physiques que chimiques ou biochimiques.

Après avoir analysé les facteurs de cette dégradation, représentés par les éléments qui agissent directement sur les propriétés du sol, nous étudierons les différentes causes qui favorisent l'action de ces facteurs.

Ces causes de dégradations sont dues, le plus souvent à l'intervention maladroite de l'homme :

- rupture de l'équilibre biologique naturel par les défrichements, favorisant en particulier l'action néfaste des agents climatiques.
- Apport inconsidéré d'éléments dont l'influence peut se révéler stérilisante si elle n'est pas combattue à temps.
- Mauvaises façons culturales.

I. LES DIFFERENTS FACTEURS DE DEGRADATION

A. FACTEURS PHYSIQUES

Les facteurs climatiques (température, pluviométrie, vent) ainsi que divers facteurs induits par l'action de l'homme tels que la pression ou l'apport de matériaux extérieurs, peuvent devenir néfaste et dégrader la fertilité naturelle des sols.

1 - La température

L'élévation importante de la température du sol entraîne :

- une destruction rapide de la matière organique
- un rendement d'humification plus faible par diminution de la synthèse d'acides humiques et par augmentation de la minéralisation.

Dès que la température moyenne du sol se maintient toute l'année aux environs de 25° la matière humique se détruit au fur et à mesure qu'elle se forme et il n'y a jamais d'accumulation ; or à Yangambi E. BERNARD a montré que la température de surface d'un sol sous forêt est comprise entre 20 et 25° mais que celle d'un sol nu peut atteindre 40°. Cette minéralisation entraîne des pertes d'azote importantes (40 à 50 kg/ha pour une élévation de température de 1° au-dessus de 20° d'après BEINAERT).

Par ailleurs DOMERGUES (1960) a montré que le rayonnement solaire était susceptible de modifier très sensiblement certaines caractéristiques du sol et en particulier la teneur en azote ammoniacal, le taux de saccharase, le dégagement potentiel de CO₂ et la densité en bactéries et en actynomycetes. Ces modifications semblent être étroitement liées aux différents types de sol.

Enfin la température va intervenir directement ou indirectement sur le profil hydrique du sol.

2 - L'eau

Son action revêt trois aspects différents :

- Dégradation de la structure
- Erosion
- Lessivage.

Dégradation de la structure

Le principal agent responsable de la dégradation de la structure du sol est représenté par les pluies. Celles-ci en effet font éclater les agrégats et dispersent les colloïdes. C'est le phénomène dit de "battance" provoquant un colmatage du sol en surface qui en s'amplifiant peut atteindre le stade érosif.

L'action de la pluie est double :

- quand un agrégat est immergé dans l'eau le liquide tend à pénétrer dans les pores du sol sous l'influence des forces capillaires. L'atmosphère qui est à l'intérieur se trouve comprimée et lorsque la pression de l'air est supérieure à la cohésion des particules de terre celles-ci éclatent et le sol se délite.
- Ce phénomène de dégradation est accru par l'action mécanique des gouttes de pluie, douées d'une énergie cinétique, qui disloque les agrégats.

C'est ainsi que la dégradation de la structure dépend de l'intensité, de la durée et de la fréquence des précipitations.

Pour une pluie peu intense et de courte durée les gouttes s'écrasent et s'infiltrant sans provoquer de destruction. Mais si l'intensité des précipitations dépasse la vitesse d'infiltration il se forme en surface un film d'eau. Cette condition est réalisée dans le cas de pluie très violentes ou bien de pluies fines mais très longues en particulier sur sols à argiles gonflantes qui deviennent imperméables. Le choc des gouttes de pluie déplace alors des particules de terre

qui retombent à des distances parfois importantes (un mètre). Les éléments grossiers se séparent des éléments fins qui sont soit entraînés par ruissellement, soit redéposés dans des microdépressions formant alors des dépôts lités caractéristiques. C'est le phénomène de battance.

L'eau agit donc sur la structure par un effet de délitage des agrégats. Cette dégradation se traduit par un glaçage de la partie superficielle du sol qui entraîne un ruissellement plus important pouvant être la cause de phénomènes d'érosion.

Erosion hydrique

L'une des actions essentielles exercées par les précipitations atmosphériques consiste comme nous venons de le voir en la formation d'éléments fins qui seront susceptibles d'être entraînés par l'eau de ruissellement, ce phénomène d'érosion sera d'ailleurs d'autant plus fort que le battage du sol par la pluie peut provoquer, en certaines conditions texturales, une obturation de la porosité en surface et de ce fait un accroissement de la hauteur d'eau ruisselée.

Cette érosion hydrique a des conséquences très néfastes sur la fertilité des sols, en entraînant une plus ou moins grande partie des horizons de surface.

En Côte d'Ivoire des essais, sur sol peu argileux, riche en sable grossier, de cohésion faible et très sensible à l'érosion mécanique de la pluie, ont donné les résultats suivants :

Pluie mm	Terre érodée Kg / ha	
	Parcelle nue	Parcelle forêt
2 400	97 744	292

Ceci est d'autant plus grave que cette couche superficielle du sol est la plus riche en matière organique et éléments minéraux utilisés par la plante.

A Madagascar ROCHE et DUBOIS ont montré que la terre érodée, dès la première année d'expérimentation, est plus riche en matière organique, chaux et potasse échangeable que le sol en place. Cette érosion sélective en base échangeable s'est accrue d'année en année et la somme des bases (S) du sol qui était de 12,6 meq/100 g en 1953 est descendu à 3,6 meq/100 g en 1959.

Cette érosion peut également être nuisible par la mise à nu d'horizons pédologiques de fertilité naturelle médiocre en particulier concrétionnés ou indurés. Certains horizons bariolés, en sol ferrallitique, mis à l'affleurement peuvent d'ailleurs se transformer en carapace ou en cuirasse sous l'action simultanée de l'oxydation et du dessèchement.

Le lessivage

Une partie de l'eau traverse le sol et s'infiltré dans les couches profondes jusqu'à la nappe phréatique. Cette "eau de drainage" entraîne les éléments minéraux solubles, c'est le phénomène de lessivage dont l'importance dans la dégradation de la fertilité naturelle n'est plus à souligner.

Des recherches faites à l'O.N.I.A. à Toulouse ont montrées qu'en particulier l'azote nitrique migre vers la profondeur à la vitesse de 1 cm pour 3 mm d'eau de drainage. En Côte d'Ivoire sur sol ferrallitique, pendant la saison des pluies ROOSE et GODEFROY (1967) indiquent que du potassium apporté au sol disparaît en profondeur (1 m 50) en dix jours. La végétation naturelle absorbant de fortes quantités d'eau limite beaucoup ce phénomène, mais l'interprétation se complique du fait qu'en sol nu le ruissellement est plus fort donc la quantité d'eau infiltrée plus faible.

3 - Le vent

Le vent peut entraîner, dans les pays sahéliens une dégradation importante de la fertilité des sols par le phénomène d'érosion éolienne.

Le transport de terre se fait surtout sous forme de nuage de poussière, près du sol, et ce sont les particules de 1/10 mm de diamètre qui s'enlèvent le

plus facilement. Les particules les plus fines se déplacent en suspension, les plus grosses sont soumises à un phénomène de saltation qui entraîne à chaque point d'impact un éclatement des agrégats et augmente ainsi le pourcentage d'éléments fins susceptibles d'être entraînés.

L'état de siccité du sol, sa structure, sa stabilité structurale joueront un rôle primordial dans ce type de dégradation.

Cette action du vent est très préjudiciable par élimination progressive des éléments fins de la surface du sol qui sont les plus riches en éléments organiques et minéraux. La fraction grossière restant en place donne des terres infertiles.

Effets de l'érosion éolienne

Eléments	Prairie non labourée (Texas)	Sable dunaire (Texas)	Poussière	
			Kansas	Iowa
	%	%	%	%
Ca O	0,34	3,31	3,15	1,98
K ₂ O	2,05	1,77	2,46	2,58
P ₂ O ₅	0,04	trace	0,24	0,19
N ₂	0,06	0,02	0,20	0,10
Matière Organique	1,06	0,33	3,34	3,35

4 - La pression

Ce facteur agit dans un sens plus ou moins défavorable suivant l'humidité du sol. Nous reprendrons ici les conclusions de HENIN (1960) :

Une terre sèche offre une résistance relativement élevée à la rupture, il faut appliquer une force considérable pour briser un élément de taille donnée ... Si on augmente progressivement l'humidité on atteint à un moment donné l'état plastique, la terre se rompt alors pour une faible déformation. Puis à mesure que l'humidité croît la terre avant de se rompre se déforme et ceci pour une pression de plus en plus faible.

Sous l'action de la pression les particules constituant le sol ont tendance à s'orienter, et à donner une structure lamellaire. C'est la structure typique de la terre des chemins. Lorsque l'effort est tangentiel la zone déformée peut se limiter à une couche très faible du sol.

Pour de plus forte pression il y a déformation du sol, surtout à l'état plastique, la porosité diminue, et la terre devient compacte.

A l'état sec la pression applique les éléments structuraux les uns contre les autres sans qu'ils aient tendance à s'écraser.

5 - Apports de matériaux extérieurs

Certains apports naturels ou artificiels de matériaux peuvent constituer également un facteur de dégradation de la fertilité naturelle. Ils peuvent entraîner un appauvrissement chimique (labour profond), une dégradation de la structure (irrigation), la création de milieu asphyxiant pour les racines (matière organique localisée en profondeur). Nous reviendrons sur cette question en étudiant les causes de la dégradation de la fertilité.

B. FACTEURS CHIMIQUES

Les apports d'éléments chimiques au sol peuvent dans certains cas être des facteurs de dégradation de la fertilité naturelle en agissant sur la concentration en ions hydrogène, la structure, le taux de matière organique ou en créant des phénomènes de déséquilibre, de carence ou même de toxicité.

1 - Les Ions acidifiants

Une variation de pH peut être créée par ce que BAYENS appelle la réaction physiologique aux engrais. C'est "la réaction qui atteint le sol par application d'un engrais sous l'influence de l'action de la racine". La plante, en effet, absorbe sélectivement certains ions au détriment d'autres. Ainsi par

exemple le chlorure de potassium, chimiquement neutre, peut acidifier le sol par production de ClH , le potassium étant absorbé préférentiellement au chlore.

Cette réaction physiologique qui, en général, reste faiblement marquée, peut se combiner à une "réaction biologique" faisant intervenir les microorganismes. Ainsi le sulfate d'ammoniac est acidifiant par l'absorption de l'ion NH_4^+ laissant dans le sol le radical SO_4^- qui se transforme en acide fort. De plus NH_4^+ peut être nitrifié par les microorganismes en NO_3H . Ces deux acides peuvent enfin se combiner aux ions Ca du sol et être ensuite lixiviés, ce qui appauvrit le sol en calcium et accroît son acidité.

2 - Les sels

Certains sels agissent en particulier sur la structure des sols, cette action est particulièrement marquée pour le sodium mais également pour le magnésium (voir cours de pédologie).

D'autre part les concentrations salines des solutions ne doivent pas être trop élevées pour éviter de créer un déséquilibre dans l'absorption des éléments minéraux et de l'eau par les plantes. Un apport inconsidéré de sels peut également entraîner une modification préjudiciable dans la nature des cations retenus sur le complexe absorbant.

3 - Les éléments minéraux

Des quantités importantes de chaux peuvent être préjudiciables à la fertilité naturelle du sol en activant la vie microbienne qui entraîne une décomposition très rapide du stock d'humus.

L'apport inconsidéré d'éléments minéraux peut induire des phénomènes de toxicité ou de déséquilibre accusé pour la nutrition des plantes. Certains de ces éléments peuvent également défavoriser le développement de certains animaux ou microorganismes favorables et rompre l'équilibre biologique naturel.

C. FACTEURS BIOCHIMIQUES

1 - Activité microbienne

Il existe entre ces organisme des phénomènes d'antagonisme, certains d'entre eux secrétant des substances "antibiotiques" toxiques pour d'autres. Par exemple la neutralisation de certaines bacteries par les Champignons pourrait être une des causes du ralentissement de la décomposition des humus bruts (WINTER 1955).

2 - Activité faunique

Les nématodes, parfois directement pathogènes, peuvent également favoriser l'action nuisible de certains autres organismes : champignons, bacteries et même virus. Dans le Sud Ouest de Madagascar les attaques de nématodes semblent faciliter la pénétration de différents Fusarium chez le Cotonnier.

Les termites, à grosse termitière épigée, peuvent, dans certains cas, être également un facteur de dégradation de la fertilité par la porosité très faible des murs de la termitière et surtout la grande pauvreté en matière organique.

3 - Excretions racinaires

Certaines plantes excretent par leurs racines des substances toxiques pour les microorganismes de la rhizosphère. Ces toxines sont spécifiques. Ce phénomène peut expliquer par exemple la disparition de certains rhizobium dans un sol qui a porté plusieurs fois une légumineuse déterminée.

La "fatigue du sol" et la nécessité de la rotation des cultures découlent, du moins en partie, de l'excrétion racinaire de la culture précédente.

Par exemple dans une forêt naturelle il s'établit une véritable rotation car les semences d'un arbre germent rarement au-dessous de lui (BAEYENS 1967).

II. LES CAUSES DE DEGRADATION

Les différents facteurs de dégradation que nous venons d'étudier n'agissent pas isolément, ils interfèrent souvent les uns sur les autres. Il en résulte des phénomènes très complexes dont l'analyse est très délicate. La synthèse de tous ces facteurs aboutit à la baisse de fertilité mise en culture (défrichement, feux, irrigation, apports inconsidérés d'éléments fertilisants).

A. LES FEUX

Les défrichements sont souvent, en pays tropicaux, accompagnés des feux seul moyen à l'heure actuelle de nettoyer les terrains en vue des cultures.

Lorsqu'un incendie court à la surface du sol la température de celui-ci peut atteindre des valeurs très élevées 100 à 850°, températures qui redescendent très rapidement à un niveau voisin de la normale (au bout de 3 à 4 minutes). L'amplitude des élévations de température dépend de la composition et du développement de la couverture végétale ainsi que des conditions météorologiques du moment.

Dès que l'on effectue des mesures de températures à quelques centimètres de profondeurs on ne constate plus que des variations de température beaucoup plus réduites (3 à 4°).

L'élévation marquée de la température en surface aboutit à la destruction totale de l'humus de l'horizon A₀ des pédologues, surtout si celui-ci est de faible épaisseur et s'il est bien dessèché. Cet horizon ne compte plus alors qu'un mélange de sables et de cendres reposant sur l'horizon sous-jacent.

D'autre part l'incendie aboutit, dans les horizons de surface à un ralentissement considérable de la vie microbienne caractérisé par :

- une diminution de la densité des Bactéries fixatrices d'azote et plus particulièrement de celles vivant en aérobie.

- une diminution marquée du pouvoir ammonifiant
- une diminution importante de la densité des organismes cellulolytiques.

Ces phénomènes sont accompagnés et contrebalancés au bout de quelque temps par un accroissement notable de la nitrification qui va de paire avec l'augmentation du pH due à l'apport de cendres. Cette explosion des germes nitreux provoque une libération brusque d'azote nitrique accompagnée d'une libération d'éléments minéraux fertilisants provenant des cendres.

Cet accroissement de fertilité est bien connu de certains cultivateurs africains qui l'utilisent systématiquement dans l'écobuage.

Cependant il ne faut pas oublier que cette augmentation de fertilité est superficielle et essentiellement fugace, car elle est accompagnée :

- d'un ralentissement considérable de la reconstitution du stock azoté, conséquence de la raréfaction des batteries fixatrices d'azote et de la réduction d'apport de matières végétales.
- d'une diminution très notable en profondeur, de l'activité des micro-organismes faisant partie des autres groupements physiologiques.
- de l'élimination de l'horizon de surface dont l'importance chimique et biologique est cependant essentielle.

B . DEFRICHEMENTS ET MISE EN CULTURE

Le fait de défricher un terrain et de le mettre en culture rompt l'équilibre biologique naturel et favorise l'action néfaste des facteurs étudiés précédemment. Il en résulte une dégradation plus ou moins importante des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

1 - Action sur les propriétés physiques

Après mise en culture le sol est souvent mal protégé contre les dégradations susceptibles d'être provoquées par les agents atmosphériques pluie et soleil notamment. La structure du sol va se dégrader, le ruissellement des pluies va augmenter et par suite les phénomènes d'érosion vont prendre une importance beaucoup plus forte que sous végétation naturelle.

En pays tropical humide, sur sol ferrallitique rouge l'indice d'instabilité structurale passe de 0,77 sous savane dégradée à 1,9 sous culture.

A Sefa en Casamance des résultats identiques ont été signalés par divers auteurs qui ont également mis en évidence des variations de densité apparente, porosité, perméabilité et résistance à la pénétration.

Comparaison de quelques caractéristiques physiques du sol sous forêt et sous culture à SEFA

Caractéristiques	Type de sol (1)	Forêt			Culture		
		0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
Densité apparente	R	1,42	1,49	1,47	1,50	1,67	1,61
	B	1,37	1,47	1,62	1,65	1,69	1,62
Porosité %	R	46	46	44	43	36	39
	B	47	44	38	37	35	38
Instabilité Is	R	0,49-0,56			1,25-1,57		
	B	0,61-0,72	0,82-1,00	1,15	1,93-2,14	2,08-2,14	
Perméabilité 1cm/h	R	2,2-2,7			2,4-2,6		
	B	2,1-2,5	2,5-3,0	2,7	1,3-1,7	1,9-2,6	
Résistance à la pénétration F en kg	B	150	160	170-880	280	810	1390-
							3450

(1) R : Sol rouge faiblement ferrallitique B : Sol beige ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions.

A Sefa, en Casamance, des études ont également montré qu'il y a une modification complète du régime hydrique des sols après défrichements. Sous forêt la pluie s'infiltré en quasi totalité, le ruissellement étant à peu près inexistant. Sous culture, au contraire on observe pendant la saison des pluies des ruissellements locaux importants allant jusqu'à 50 % de la pluviométrie. Le développement de l'érosion peut alors être élevé (100 fois plus sous culture que sous forêt).

Mesures d'érosion effectuées à SEFA

! Couverture végétale !	! Pluie moyenne !	! Terre érodée t/ha moy. !
! Forêt protégée !	! 1 138 !	! 0,08 !
! Forêt brûlée !	! 1 167 !	! 0,18 !
! Cultures (arachide, ! Coton, Sorgho, Riz, Maïs) !	! 1 200 !	! 8 à 10 !

2 - Action sur les propriétés chimiques

Toute plante cultivée ou non prélève dans le sol une certaine quantité d'éléments minéraux et les stocke dans ses tissus. Mais pour les plantes cultivées il y a, à la récolte, exportation d'une partie de ces éléments. La culture continue, contribue donc à un appauvrissement rapide du sol.

De plus nous avons vu que les phénomènes d'érosion étaient beaucoup plus important sous cultures que sous végétation naturelle. Or cette érosion s'exerce sur les horizons de surface qui sont souvent les plus riches en éléments nutritifs.

En Casamance des études ont permis de chiffrer la baisse de la matière organique et des éléments échangeables ainsi que les pertes dues aux exportations par les plantes et à l'entraînement par lessivage ou érosion.

Modifications provoquées dans l'horizon supérieur du sol par sa mise en culture - arachide - mil

(Sol Rouge faiblement latéritique - Bignons - Casamance)

Etat du sol	Mat. Organ.	El. échangeables		El. perdus par le sol			Kha
	p. 100	p. 1000	p. 1000	CaO	CaO	MgO	MgO
		CaO	MgO	export	entrain	exp.	entr.
Sous forêt	22	2,7	0,63	-	-	-	-
Après 5 ans de culture	8,5	0,4	0,27	190	6.900	85	1.080
Après 10 ans de culture	3,8	0,3	0,13	190	300	85	420

L'importance de cette érosion dépend en grande partie de la couverture du sol et donc des successions culturales effectuées.

Pertes en terre et éléments minéraux sous différentes rotations

ROCHE - DUBOIS (Madagascar)

Type de sol	Rotations	Moy perte en terre t/ha	M.O. totale	Pertes en éléments fertilisants Kg / ha				
				N	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
Sol rouge ferrallitique sur amphibolite	Arachide	15,6	655	44	25	7	4	6
	Engrais vert Manioc-four- rage							
	A.E.V. Ms. F	12,1	508	34	20	6	3	4
	A. Pr temp	7,7	323	22	12	4	2	3

A = arachide E.V. = Engrais vert. M = Manioc Ms = Maïs
F = fourrages Pr = prairie temporaire.

La mise en culture par défrichement entraîne également un lessivage important d'éléments minéraux. En effet la matière organique minéralise rapidement au moment de la mise à nu du sol ; il y a alors excès d'éléments nutritifs qui ne peuvent être utilisés par la plante et sont entraînés par lixiviation. Cet entraînement en profondeur des bases se traduit par une diminution sensible du pH : 0,2 unités par an sur sols ferrugineux en Casamance (FAVAK). Au bout de plusieurs années cette baisse de pH peut avoir des répercussions sur la vie microbienne et la disponibilité des éléments minéraux.

Enfin la mise en culture peut modifier le cycle des éléments chimiques. Un très bon exemple est fourni par les études menées par B. DABIN en basse Côte d'Ivoire sur l'acide phosphorique. Dans ces sols ferrallitiques lessivés, à texture sableuse, les teneurs en acide phosphorique total sous végétation forestière sont relativement élevées. Pourtant lorsqu'on abat la forêt pour y pratiquer une culture, on constate pendant 2 à 3 ans une carence nette en acide phosphorique. Puis cette carence disparaît pour réapparaître brutalement 2 ou 4 années plus tard et s'accuser de plus en plus. Si on laisse plusieurs années en jachère les carences disparaissent à nouveau lentement.

L'étude des différentes formes du phosphore dans ces sols fait apparaître du phosphore organique, des phosphates d'alumine, des phosphates de fer d'inclusion et de retrogradation en proportions variables suivant les différents états d'utilisation du sol. Aussi sous forêt il y a prédominance de formes organiques. La mise en culture provoque la combustion de ces dernières qui se transforment en phosphate d'alumine puis de fer. La carence disparaît puis le phosphore évolue de plus en plus vers des formes combinées au fer pour s'intégrer peu à peu au réseau cristallin. A ce stade les carences sont extrêmement graves. Sous jachère les teneurs en phosphore organique augmentent à nouveau. Il y aurait réduction et chélation du phosphate de fer par la matière organique provoquant un accroissement des formes organiques au dépend du phosphate de fer d'inclusion. Le cycle peut alors recommencer.

3 - Action sur les propriétés biochimiques

La protection du sol étant plus ou moins bien assurée contre les rayonnements solaires la minéralisation de l'humus va être plus forte et la synthèse humique plus faible sous culture que sous végétation naturelle.

A Yangambi (Congo Belge), le taux d'humus en forêt dans la couche superficielle de 0,50 m, oscille de 1,25 à 1,29 %, ce qui représente 100 tonnes d'humus au sens large (chiffres de Beirnaert).

Pour apprécier la rapidité de la destruction de l'humus, on a comparé 3 parcelles contigües à la forêt ; les 3 parcelles ayant été à l'origine défrichées par incinération totale.

Parcelle n° 1 : En clean weeding depuis 3 ans.

- n° 2 : plantée de palmiers, en clean weeding depuis 3 ans.
- n° 3 : un chemin de délimitation n'ayant pas servi à la circulation parce que non dessouché ; en clean weeding depuis 6 ans.

Parcelles	Temps écoulé depuis l'incinération.	% d'humus dans la couche sup. de 0m,50	Poids total d'humus de la couche de 0m,50	Perte annuelle d'humus
Parcelle n° 1 forêt contigüe perte	3 ans	± 0,87 1,29	70 t. 103 - 33 -	11 t.
Parcelle n° 2 forêt contigüe perte	3 ans	0,91 1,29	73 - 103 - 30 -	10 t.
Parcelle n° 3 forêt contigüe perte	6 ans 1/2	0,51 1,25	41 - 100 - 59	9 t.

La perte a été annuellement d'environ 10 % de la quantité primitive. Ce chiffre est confirmé à Ceylan par les observations de Joachim, qui a trouvé 9 % de perte annuelle et en Uganda où l'on a enregistré également des pertes annuelles de 10 %.

A ces pertes s'ajoutent celles dues à l'érosion qui entraîne une partie de l'horizon humifère comme nous l'avons vu précédemment.

Enfin l'approvisionnement en matière organique est très différent sous végétation naturelle et sous culture. Exprimées en tonnes de matière organique à l'hectare sur 20 cm de profondeur les valeurs moyennes passent à BAMBEY de 11,5 t/ha sous culture à 13,5 t/ha sous jachère longue et 22,6 t/ha sous *Acacia Albida* pour des sols d'or sableux. A séfa la différence entre forêt et culture est également très marquée, respectivement 33,8 t/ha et 21,4 t/ha. Ceci provient du fait que les cultures produisent en général un tonnage de matière verte inférieur à celui de la végétation naturelle. D'autre part suivant les cultures envisagés une grande partie de cette matière organique est exportée par les récoltes.

4 - Action sur les propriétés biologiques

- En Casamance l'action de la mésofaune est importante sous forêt claire et se traduit dans l'horizon superficiel du sol (10 cm) par une amélioration très sensible de la porosité, de la structure et de l'ameublissement. Après mise en culture cette action disparaît peu à peu complètement.

- En ce qui concerne l'activité microbienne le fait de modifier la couverture végétale, dans le sens d'une diminution de la protection du sol contre les radiations solaires, entraîne des modifications importantes.

C'est ainsi que des numérations de la microflore des sols faites par DOMMERCUES montrent que les amylolytiques passent de 50 000 à 900 000 par gramme de terre du sol nu au sol couvert, les nitreux de 250 à 890 et les cellulolytiques aérobies de 480 à 1720, par contre les champignons restent inchangés. La couverture du sol protège donc très efficacement la microflore nitrificative, cellulolytique et mylolytique.

- La mise en culture peut également, dans certains cas, créer un milieu favorable au développement de certains parasites nuisibles à la répétition de cette même culture plusieurs années consécutives.

- Enfin nous avons déjà signalé l'action toxique de certaines ex-
crétions racinaires pour les microorganismes de la rhizosphère de certaines
plantes.

5 - Conclusion

Le défrichement et la mise en culture favorisent l'action de nombreux
facteurs de dégradation en particulier des facteurs olimatiques. La déforesta-
tion entraîne une détérioration très rapide des propriétés physico-chimique
des sols, le défrichement de savane aura des effets moins sensibles. Toute-
fois ces pratiques constituent un préalable indispensable à la mise en cul-
ture, nous verrons dans un prochain chapitre les précautions à prendre et les
remèdes à apporter pour atténuer ces effets néfaste.

C. TRAVAUX CULTURAUX

Les travaux culturaux (enfouissement de matière organique, travail
du sol, irrigation) peuvent dans certaines conditions favoriser l'action des
facteurs de dégradation.

1 - Enfouissement de matière organique.

La place dans le sol de la matière incorporée, sa nature, sa dis-
position peuvent avoir des influences néfastes.

- Localisées dans le fond du sillon en couche continue ces matières
peuvent constituer un obstacle à la pénétration des racines
vers la profondeur et à la remontée d'eau capillaire vers la
surface. La présence de gros amas de paille ou de fumier peut
également entraîner des déformations des systèmes racinaires
pivotants.

- Si ces matières sont incorporées dans un horizon compact, mal aéré, des fermentations anaérobies se développent créant des conditions de plus en plus réductrices. Les matières organiques consomment en effet le peu d'oxygène qui peut parvenir à ce niveau. Ces phénomènes, accompagnés de gleyification s'observe surtout avec les engrais verts qui sont des matières très fermentescibles.

2 - Le travail du sol

La préparation du sol peut provoquer des accidents structuraux préjudiciables à la fertilité naturelle dont il faudra se méfier.

- La "semelle de labour", créée par le passage du soc de la charrue dans une terre trop humide, peut provoquer un engorgement de la partie superficielle du sol et accentuer le phénomène de battance. Elle peut également constituer un obstacle à la pénétration des racines. Le tassement énergétique provoqué par le passage d'engins lourds sur des sols humides peut détruire leur structure et les rendre très compacts. Le piétinement des animaux peut produire le même phénomène en cas de surpâturage.
- Si ces "semelles" apparaissent surtout après le passage des charrues à soc elles peuvent également être créées par les charrues à disques, les cultivateurs ou les herses. Il faut éviter de travailler sur sols trop humides et varier la profondeur de travail.
- L'ameublissement en surface peut entraîner, par des phénomènes d'oxydation plus poussés, une destruction rapide de la matière organique. Les éléments humiques se minéralisent et tendent à disparaître. C'est la raison pour laquelle une terre travaillée est plus sensible à la dégradation de sa structure qu'une terre vierge.

Il n'est donc pas conseiller "d'émietter" le sol de façon exoessive.

- Les labours profonds, modifiant la succession naturelle des horizons peut également être un facteur important de dégradation. Ils ramènent en surface une terre plus compacte et moins riche en matière organique donc beaucoup plus instable. Il est préférable d'effectuer un labour superficiel et un griffage ou un sous solage en profondeur, toutefois là encore on risque l'inconvénient d'obtenir une "terre creuse", c'est pourquoi ces travaux doivent être effectués quelque temps avant la mise en culture.
- Enfin le labour peut avoir une action nuisible sur la faune du sol. En particulier il peut réduire la population de vers de terre de 70 % en cinq ans.

3. Irrigation

L'irrigation, souvent indispensable, peut, si certaines précautions ne sont pas prises, avoir des effets défavorables sur la fertilité.

- Les irrigations superficielles (aspersion) développent le système racinaire de surface, avec danger de dessiccation surtout en sol sableux. La pluie artificielle doit se conformer à des schémas bien adaptés au sol et à la plante envisagée .
- Ces irrigations peuvent également, si elles sont trop fréquentes, nuire à la bonne activité biologique du sol.
- Enfin si les apports d'eau sont importants ceux-ci vont devenir un facteur de dégradation de la structure.

Les eaux d'irrigation peuvent être nocives lorsque leur conductivité est supérieure à 750 mmho, au delà de 2 250 mmho ces eaux ne doivent jamais être utilisées. Parfois l'on fait également intervenir la nature des cations, c'est ainsi que le rapport $\frac{Na}{Ca}$ doit être inférieur à 75 % ou mieux à 50 %. La présence de bore peut également être nocive pour les plantes, la concentration de cet élément doit être inférieure à 2 ppm, pour être acceptable, une eau considérée comme bonne aura une concentration à 0,5 ppm.

Pour éviter une salinisation progressive du sol il faut souvent augmenter les quantités d'eau utilisées : on peut estimer à 20 % minimum et 40 % maximum la quantité d'eau qui doit drainer librement pour entraîner les sels apportés par l'irrigation précédente. Il ne faut pas non plus négliger les risques d'augmentation de la salure des nappes phréatiques.

Enfin dans des conditions d'irrigations faibles avec des eaux salines et sur un sol relativement mal couvert par la végétation une forte évaporation peut entraîner des concentrations de sels en surface qui peuvent devenir toxiques.

D - APPORTS D'ÉLÉMENTS CHIMIQUES

1 - Action sur les propriétés physiques

a) Action acidifiante.

L'action du sulfate d'ammonium est bien connu. Dans l'Ouest Cameroun sur deux types de sol (sols ferrallitiques rouges sur basaltes anciens, et sols jeunes derivant de cendres volcaniques) l'influence de cet engrais a été marqué par une baisse de plus d'une unité pH en quatre ans sous culture caféière . Les applications de soufre élémentaire peuvent également accroître l'acidité du sol.

b) Action peptisante

Le purin contient du chlorure de sodium et des doses massives et répétées apportent trop de sodium qui détériore la structure du sol, en particulier en terres lourdes.

De même les nitrates sodiques, s'ils sont appliqués trop souvent, ont un pouvoir peptisant surtout en sol argileux.

Effet des engrais sodiques sur la structure

BAYENS 1963

Engrais	Doses	Perméabilité relative.
Na Cl	Nulle	100
	faible	95
	- moyenne	85
	forte	82
Na NO ₃	Nulle	100
	faible	98
	moyenne	93
	forte	79
Sylvinite	Nulle	100
	faible	98
	moyenne	93
	forte	87

Quantité d'engrais appliquée Kg/Kre

! Faible dose : 0,629 Kg Na (1600 Kg Cl - 2.440 NO₃ Na - 2.584 sylvinite)
! Dose moyenne: 1,258 Kg Na (3200 Na Cl - 4.880 NO₃ Na - 5.168 sylvinite)
! Dose forte : 2.515 Kg Na (6400 Na Cl - 9.760 NO₃ Na -10.336 sylvinite)

2 - Action sur les propriétés chimiques

a.) Action toxique.

Certains sous-produits industriels utilisés comme fertilisants peuvent contenir des substances toxiques : la chaux éteinte provenant de la fabrication du carbure de calcium peut parfois contenir des éléments très nocifs comme des sulfines ou des cyanures.

L'utilisation de certains produits anticryptogamiques peuvent également à la longue provoquer des phénomènes de toxicité. En particulier le traitement des vignobles par la bouillie bordelaise enrichissent la couche arable du sol en cuivre (10 à 15 Kg/ha par an ; 200 à 250 ppm en une cinquantaine d'années) ; cet élément, étant retenu par le complexe, reste localisé en surface et n'a pas d'action sur le système racinaire profond de la

vigne. Mais après défrichage les phénomènes de toxicité apparaîtront sur les cultures annuelles. Cette toxicité sera d'autant plus accusée que des traitements à base de soufre élémentaire ou de bouillies sulfo calciques auront été effectués, ceux-ci provoquant une baisse du pH qui favorise l'assimilabilité du cuivre.

b) Déséquilibre et carence.

Le fait de vouloir enrichir le sol en éléments minéraux pour en augmenter la fertilité peut induire un effet contraire en créant un déséquilibre accusé entre les différents éléments (voir le chapitre sur les facteurs chimiques de la fertilité naturelle).

Par exemple un chaulage excessif peut entraîner une carence magnésienne par diminution de l'absorption de cet élément. De plus l'ion calcicum va libérer de nombreux cations du complexe absorbant, K en particulier, qui se trouveront soumis au lessivage.

Des déséquilibres entraînant des phénomènes de carence se manifestent également par l'emploi de fertilisants ne contenant que les éléments majeurs N, P, K. C'est ainsi que l'utilisation de l'urée à la place du sulfate d'ammoniaque déclenche sur certains sols des carences en soufre. Bien d'autres oligo éléments deviennent facteurs limitants par l'emploi d'engrais chimique de plus en plus pur.

3 - Action sur les propriétés biologiques

Certains engrais défavorisent le développement de certains animaux favorables à la fertilité naturelle. Ainsi le sulfate d'ammonium le sulfate de potassium et le phosphate d'ammonium (surtout si le pH descend au-dessous de 4,5 à 5) sont nuisibles aux vers de terre. (BACHELIER 1963)

Certains insecticides ou herbicides peuvent également avoir une action néfaste sur la faune des sols.

Une fumure azotée abondante fait disparaître les rhizobium responsables de la fixation symbiotique de l'air atmosphérique par les légumineuses.

Enfin des applications massives de chaux sont préjudiciables à la fertilité naturelle du sol en activant considérablement la vie microbienne qui entraîne une minéralisation très rapide de l'humus.

III. TECHNIQUES DE RESTAURATION

INTRODUCTION

Le maintien de la fertilité naturelle d'un sol est conditionné par l'utilisation d'un certain nombre de techniques culturales. Certaines ont pour objet la restitution au sol des éléments minéraux qui ont été exportés, d'autres doivent limiter l'érosion du sol, pourvoir au maintien de la structure, limiter la propagation des maladies.

En culture extensive la seule possibilité qui existe pour maintenir la capacité productive du sol, est bien souvent d'abandonner la terre pendant une période plus ou moins longue durant laquelle la végétation naturelle reconstituera le potentiel organique et minéral du sol.

Cette pratique culturale peut être complétée par d'autres palliatifs à la dégradation de la fertilité naturelle tels que : les rotations culturales, la lutte contre l'érosion, la restitution au sol des déchets de récolte, etc... Ces méthodes de conservation de la fertilité sont étudiées dans les cours d'Agronomie et génie rural, aussi nous ne les mentionnons ici que pour mémoire.

A - LES JACHERES

L'épuisement relativement rapide des sols par la mise en culture conduit les agriculteurs à abandonner les champs au bout de quelques années pour les laisser "se reposer". C'est ainsi qu'apparaît le système de jachère. Pendant ce repos la végétation spontanée ou introduite (jachère naturelle ou artificielle) va agir sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Cette restauration de la fertilité demandera évidemment un temps plus ou moins long suivant l'état de dégradation du sol et la nature de la jachère.

Nous étudierons le mode d'action des jachères forestières ou herbacées et nous essaierons de préciser quel doit être l'équilibre entre le temps de jachère et le temps de culture.

1 - MODE D'ACTION DES JACHERES

L'action des jachères, variable suivant les espèces végétales colonisantes, améliorera de façon plus ou moins marquée les propriétés physiques et chimiques d'un sol dégradé par la mise en culture.

Les résultats obtenus sont souvent contradictoires, ceci s'explique en partie par la diversité des modes d'actions des plantes. En effet ces dernières peuvent agir par l'ameublissement du sol dû aux racines, l'apport de matières organiques, la fixation d'azote atmosphérique ou la couverture du sol limitant l'action dégradante des agents atmosphériques (érosion en particulier). Ces actions ne se manifestent qu'en fonction des besoins de la culture envisagée et du milieu, aussi les résultats positifs ou négatifs obtenus localement ne sont pas généralisables.

- Action sur les propriétés physiques

Le système racinaire des plantes de jachères, va, par une action mécanique, ameublir le sol et restaurer sa structure. Les mécanismes mis en cause sont encore très mal connus. Les résultats de cette action dépendent des espèces végétales colonisantes et de la durée de la jachère, ces deux facteurs étant eux-même fonction de la dégradation initiale de la structure.

Cette évolution de la restauration de la structure liée aux associations végétales et à l'âge des jachères a été en particulier étudiée sur sols ferrallitiques, en République Centrafricaine par MOREL et QUANTIN (1964). Ces auteurs ont montré que l'implantation de la flore spontanée suit généralement une série de phases qui correspondent chacune à un stade différent des conditions écologiques de la jachère. Ce phénomène peut être plus ou moins rapide. L'évolution comporte trois ou quatre stades nettement différenciés caractérisés par des types de graminées assez bien définis et correspondant à des états structuraux de plus en plus restaurés.

1er stade : Graminées à port rampant ou peu élevé, leur enracinement est superficiel. L'installation de cette phase se fait toujours rapidement (deux semaines à un mois). La persistance de ce stade de jachère varie suivant le degré de fertilité du sol. La durée moyenne est de six mois avec minimum de trois à quatre mois et un maximum de 16 à 18 mois en sol très dégradé.

La structure est massive en voie de régénération superficielle. $Is > 1,3$

2e stade : Stade à graminées érigées de taille moyenne. Cette seconde phase commence en moyenne après six mois de jachère et se termine après 3 ans à 3 ans 1/2 sur un sol très dégradé. Structure grenue ou nuciforme en surface et massive en profondeur. $Is > 1,3$.

3e stade : Stade des graminées de grande taille. Cette 3ème phase commence généralement la 4ème année de jachère. Structure grenue ou nuciforme en surface, début de division large en profondeur $0,8 < Is < 1$. Dans le cas général la troisième phase est terminale. Toutefois on peut trouver :

4e stade : Pennisetum purpureum.

Ce stade ultime peut apparaître dès la deuxième ou la troisième année sur sol particulièrement fertile (humifère, meuble et frais. Sol bien structuré sur 5 à 10 cm et assez bien structuré en profondeur (nuciforme à polyédrique fine) $0,4 < Is < 0,8$.

Nous voyons donc qu'en quelques années de jachères l'indice d'instabilité structurale passe de 1,3 à 0,4 et que la structure elle-même est de mieux en mieux développée.

- Action sur les propriétés chimiques

L'une des fonctions la plus importante de la jachère est d'accumuler des éléments minéraux dans les parties aériennes de la végétation à partir desquelles ils seront libérés par brulage ou minéralisation lors de la mise en culture. Ce rôle de la jachère revient à produire sur place par extraction du sous sol les éléments fertilisants qui devraient être importés en culture intensive.

Deux éléments déterminent la quantité d'éléments minéraux libérés lors du défrichement d'une jachère : d'une part l'immobilisation minérale effectuée, d'autre part la fraction de cette immobilisation mise à la disposition des plantes. Il est évident que l'âge de la jachère influencera considérablement ces deux facteurs : l'immobilisation augmente avec l'âge de la jachère mais une fraction de plus en plus importante de cette immobilisation se fait dans les troncs et les grosses branches qui ne seront pas consommés par le feu ou se décomposeront très lentement.

Compte tenu de cette fraction minérale qui n'est pas libérée les apports en fonction de la durée d'une jachère forestière s'établissent comme l'indique le tableau suivant :

Comparaison du potentiel minéral libérable par des jachères forestières de divers âges et de l'apport mesuré en Kg/ha.

Age jachère	Ca	Mg	K
5 ans mesure sur végétation	150	89	218
8 ans " " "	186	102	232
15 ans " " "	190	101	260
30 - 35 ans mesure sur sol	230	78	131
30 ans " " "	324	73	118

La faible quantité de potassium retrouvé dans le sol par rapport à celle présente sur végétation s'explique par la présence d'une partie importante de cet élément dans les fractions les moins combustibles.

Dans les premiers stades l'immobilisation minérale des graminées se compare très favorablement à celle d'une jachère forestière.

IMMOBILISATION MINERALE
en cuvette centrale Congolaise (LAUDELOUT)

Type de jachère	Age	M ₀ S T/ha	N	P	K
Forestière	2	20	190	22	160
	5	112	580	32	420
	18	173	700	108	820
Herbacée :	1	29	275	22	305
Pennisetum	2	40	327	22	446
Purpureum	3	31	258	32	215

Eléments minéraux accumulés par différentes jachères naturelles
au Ghana (Kg/ha)
NYE (1962)

Nature de la jachère	N	P	K	Ca	Mg
Savane guinéenne boisée					
) arbre	97	14	143	231	61
(plus de 20 ans)					
) strate herbeuse	39	11	55	35	30
Forêt secondaire					
(environ 20 ans)	562	38	401	513	209

2. EQUILIBRE ENTRE TEMPS DE JACHERIE ET TEMPS DE CULTURE

- Jachère forestière

Nous avons vu précédemment que le potentiel libérale par le feu ne dépend guère de l'âge de la jachère forestière au-delà de quelques années. En effet la masse de feuilles, et de branchages, à partir de laquelle la libération se fait surtout, ne s'accroît plus guère après 5 à 10 ans. L'essentiel de l'accroissement de l'immobilisation minérale se fait alors dans les troncs et les grosses branches qui ne sont pas brûlées en conditions normales.

On peut donc conclure qu'il y a pas d'intérêt à prolonger la durée de la jachère forestière au-delà de 10 à 15 ans tant du point de vue de la synthèse de matière organique aisément minéralisable que de celui de l'immobilisation d'éléments minéraux.

D'autre part étant donné la quantité relativement faible d'éléments minéraux apportés par cette jachère forestière et le lessivage que subissent les sols des tropiques humides, il n'y aura pas d'intérêt à prolonger le cycle de culture au-delà de deux à trois années.

- Jachère herbacée

Dans le cas des jachères herbacées naturelles il faut limiter la durée du cycle cultural de façon à ne pas dépasser le stade critique de dégradation physique du sol ($I_s = 1,3$ à $1,5$), stade au-delà duquel la jachère naturelle ne répartirait que très lentement. En moyenne le temps de culture sera de deux à quatre ans et celui de la jachère de trois ans minimum.

En République Centrafricaine MOREL et QUENTIN donne les conseils suivants :

" Le praticien aura toujours intérêt à observer la flore d'une jachère naturelle pour en déduire le stade de régénération de la fertilité du sol, et savoir ainsi à quelle époque il pourra reprendre l'exploitation culturale.

En général, sur sol normalement dégradé, dans les conditions de sol et de climat de notre étude, après quatre ans de culture, la jachère n'atteint pleinement la troisième phase qu'en quatrième année. Dans ce cas, la réouverture des terres à la culture ne doit pas se faire avant quatre ans.

Exceptionnellement, sur un sol très dégradé, la jachère peut être encore au deuxième stade après quatre ans, et l'apparition du troisième stade ne peut se faire qu'en cours de la cinquième ou sixième année. Dans ce cas, le sol ne doit pas être remis en culture avant cinq ou six ans.

A l'inverse, certains sols ne sont qu'assez peu dégradés lors de la mise en jachère. Ceci se voit à la suite d'une période culturale courte ou par suite du maintien de la fertilité par l'apport d'amendements organiques, ou après certaines rotations uniquement céréalières (maïs, sorgho, riz) peu dégradantes pour la structure du sol. Dans ce cas, l'installation du troisième stade de jachère peut être rapide et se faire dès la deuxième ou troisième année. La réouverture du sol à la culture peut se faire alors après cette courte période de jachère.

En résumé, il ne faut jamais réutiliser un champ en jachère qui n'aurait pas atteint la fin du deuxième stade (jachère Rottboellia, par exemple), ou mieux le troisième stade (*Panicum maximum* dans le cas de Grimari).

C O N C L U S I O N

Le rôle des jachères herbacées assurent la protection du sol pendant toute l'année et améliorent la structure et la porosité dans l'horizon superficiel, mais par ailleurs elles n'amènent pas de changement notable dans le bilan organique. Leur action peut être importante pour maintenir la fertilité dans des systèmes de culture à caractère extensif ou dans des régions très défavorisées du point de vue sol et climat. Dans ces conditions en effet les cultures ont un faible développement végétatif et racinaire. Il est alors nécessaire de recourir à des successions culturales courtes entrecoupées de jachères. Dans les régions plus favorisées et en culture intensive le rôle protecteur et dans une certaine mesure améliorateur de la jachère peut être joué par une culture appropriée (CHARREAU 1967).

B. LES ROTATIONS CULTURALES

Très tôt les agriculteurs se sont aperçus que la monoculture "fatiguait" rapidement le sol alors que la polyculture avec un système judicieux de rotations sur la même parcelle permettait de conserver plus longtemps la fertilité du sol à un niveau satisfaisant.

Un essai a été mis en place à BAMBEY sur sol d'ion pour comparer une rotation triennale jachère - Arachide - Mil et une culture continue d'arachide.

Evolution comparée des rendements en arachide.

Cultures	Année	1956	1957	1958	1959	1960
Arachide continue		800	700	761	997	800
Arachide en rotation		711	931	1037	1335	1022

Dès la troisième année de culture apparaît une différence de rendement très sensible en faveur de la rotation triennale.

Ces rotations culturales sont basées sur les principes suivants :

- Les profondeurs d'enracinement, différentes suivant les cultures envisagées, permettent, en rotation, d'exploiter les différents horizons du sol.
- L'introduction de légumineuses enrichit le sol en azote pour la culture suivante.
- Les travaux culturaux effectués sur les cultures sarclées permettent d'éliminer une grande partie des mauvaises herbes.

- L'infestation d'une culture par certains parasites, peut être éliminé par l'introduction d'un autre végétal l'année suivante.

(Voir le cours d'Agronomie Générale).

C. LES RESTITUTIONS ORGANIQUES

Les apports de matière organique seront traités dans un chapitre ultérieur. Nous insisterons simplement ici sur la nécessité de n'exporter que la partie des végétaux utile et de restituer au sol la totalité des déchets de récolte. Ceci contribuera à ralentir dans une large mesure l'appauvrissement du sol.

Exemples d'exportation.

B a n a n i e r

	Quantités d'éléments minéraux	
	Immobilisés (Kg/ha) (2500 pieds par variétés "Nani")	Exportés (Kg/ha) La tonne / ha de régime
N	225	40 à 80
P	24	7 à 9
K	861	170 à 180
Ca	87	4 à 11
Mg	16	4 à 12

(MARTIN--PREVEL Guinée)

Nous voyons ici que les restitutions par rapport aux exportations sont importantes. Toutefois il faut noter que cette restitution n'interviendra que plusieurs mois après la première récolte, il faut donc que le sol fasse une première avance importante.

A n a n a s

	Quantités d'éléments minéraux	
	Immobilisés (Kg/ha) (38.500 pieds/ha)	Exportés (Kg/ha) 55 t/ha de fruits
N	205	43
P ₂ O ₅	58	16,5
K ₂ O	393	131
CaO	121	17
MgO	42	10

(MARTIN-PREVEL Guinée)

Ici encore non voyons l'importance de la restitution des déchets de récolte.

C o t o n

Quantités d'éléments minéraux

Exportés par la culture cotonnière (GEORGIE)

(565 Kg / ha de fibre)

Partie du cotonnier	Eléments minéraux		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Graine + Fibre	39,7	15,9	15,9
Carpelles secs	5,67	3,4	23,81
	45,37	19,3	39,71
Tiges - Branches - Feuilles	106,60	48,76	95,25

Ici encore il semble très intéressant de ne pas exporter les résidus végétaux.

Toutefois dans certains cas la restitution des déchets de récolte peut être nuisible. En particulier pour le coton l'arrachage et le brûlage des plantes est le seul moyen actuel pour juguler de façon générale une partie du parasitisme en empêchant les générations successives d'insectes de se multiplier d'une campagne à l'autre à la faveur des débris végétaux restés sur les anciennes plantations.

D. LUTTE ANTIEROSIVE

Tous les travaux culturaux (ombrage, plante de couverture, terrasses etc...) et les travaux de génie rural contribuant à lutter contre l'érosion déclanchée par la mise en culture contribueront à conserver la fertilité naturelle du sol. (Voir cours de Génie rural).

DEUXIEME PARTIE

AMELIORATIONS DE LA FERTILITE
NATURELLE

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

Nous avons vu dans les chapitres précédents que la majorité des sols tropicaux présentent un faible niveau de fertilité naturelle ; en conséquence les rendements sont faibles et la production agricole insuffisante. Les jachères sont longues et d'une efficacité incertaine.

L'élévation du niveau de fertilité apparaît donc comme une condition nécessaire au développement de l'Agriculture.

Parmi les facteurs de la fertilité un certain nombre apparaissent non modifiables ou difficiles à modifier sans des investissements très importants (profondeur du sol, texture, agents atmosphériques). D'autres facteurs au contraire peuvent être améliorés dans une large mesure.

Nous étudierons dans cette partie du cours toutes les techniques permettant d'accroître le niveau de fertilité naturelle par action sur les facteurs limitants liés au milieu physique, physico chimique, chimique et biologique.

C H A P I T R E I

AMELIORATIONS PHYSIQUES ET PHYSICO CHIMIQUES

Nous avons souligné au début de ce cours l'importance des facteurs physiques et physico chimiques dans la fertilité des sols. L'étude des propriétés des divers constituants du sol nous a permis d'entrevoir la possibilité d'améliorer certains facteurs favorables soit par des apports extérieurs (amendements) soit par des travaux culturaux appropriés (travail du sol, irrigation, drainage ...).

I. LES AMENDEMENTS

On appelle amendements tous produits qui, incorporés au sol, en améliorant les propriétés physiques et physico-chimiques, ces améliorations pouvant entraîner également des modifications chimiques ou biologiques.

Les amendements se différencient essentiellement des fumures en ce sens que, sauf cas particulier, ils ne sont pas utilisés directement par les plantes. Ils sont destinés avant tout à améliorer le potentiel de fertilité et par là même à accroître les rendements.

A - AMENDEMENTS TEXTURAUX

Nous avons vu que la texture, reflet global de la granulométrie, influençait fortement la cohésion de la terre humide qui est le facteur de résistance de la structure à l'action de l'eau. D'une façon plus précise, la stabilité croît généralement avec la teneur en argile et dans de nombreux cas, avec le rapport argile/limon.

Les moyens pratiques dont on dispose pour modifier la texture du sol sont toutefois peu nombreux et leur efficacité très relative ; de plus ces opérations ne sont guère applicables que dans le cadre de cultures très rémunératrices.

- Les marnages massifs, à l'aide d'amendement, contenant une proportion importante d'argile calcaire, ont pu, dans certains cas en pays tempérés, s'ils ont été répétés sur la même parcelle, élever légèrement la teneur en argile du sol. L'action sur la stabilité en est toutefois difficile à évaluer car la chaux, apportée à des doses suffisantes, accroît elle aussi, la stabilité structurale.

- L'alluvionnement dirigé, utilisant les eaux chargées de particules fines pour l'irrigation des terres permet d'une façon souvent moins onéreuse d'améliorer certains sols. C'est grâce à ce procédé que des pays, comme l'Egypte ont accru la fertilité de vastes superficies dans la vallée du Nil. Dans le Sud Dahomey le delta de l'Ouémé, vaste plaine alluviale, est inondée chaque année par d'importantes crues dont les apports jouent un grand rôle fertilisateur. Cet amendement influe sur les propriétés physiques mais également sur le potentiel chimique.

- Les labours profonds, peuvent être considérés comme un amendement dans la mesure où ils sont effectués dans le but d'apporter dans la couche arable des éléments texturaux du sous-sol. Une telle opération ne doit pas toutefois être entreprise sans examen préalable :

- on doit s'assurer que l'argile du sous-sol ne présente pas de propriétés défavorables (des tests de stabilité structurale peuvent fournir des éléments de jugement à cet égard) ;

- d'autre part, approfondir la couche labourée revient à diluer, non seulement les éléments minéraux qu'elle contient, mais aussi la matière organique. Dans de nombreux cas, l'accroissement de fertilité escompté peut ainsi être diminué, voire annulé.

B. LES AMENDEMENTS CALCIQUES

Ces amendements peuvent être utilisés pour modifier les propriétés physiques (structure) ou physico-chimiques (pH).

1 - Action sur la structure

En régions tropicales dans lesquelles la structure des sols dépend souvent d'un ciment ferrugineux, il ne semble pas qu'un chaulage modéré puisse améliorer d'une façon sensible la structure. Ce résultat ne sera atteint qu'avec des quantités d'amendements telles qu'il persistera du carbonate de calcium libre dans le sol. C'est le cas en particulier lors d'applications massives d'écume de défécation de sucrerie.

Par contre ces amendements sont très favorables lorsqu'il s'agit de substituer aux ions sodium, peptisant, des ions calcium, flocculant. La réalisation pratique de cet échange présente quelques difficultés :

- Lorsque la solution du sol contient du chlorure de sodium, comme c'est le cas des terrains côtiers qui viennent d'être exondés, les colloïdes, bien que sodiques, sont flocculés. Le sol est alors perméable et l'échange peut se faire à l'aide d'un sel de calcium de solubilité convenablement choisie tel que le plâtre (SO_4Ca).

Ce sel, appliqué en couverture, a dans ce cas en effet, la possibilité de pénétrer dans la masse du sol. Les chlorures et le sodium déplacé sont entraînés par lessivage, si le drainage de la parcelle est correctement assuré.

- Par contre, si l'on attend que la pluie ait entraîné les chlorures en profondeur, le sol devient imperméable, car en l'absence de sel, les colloïdes sodiques sont dispersés. L'échange devient alors très difficile, comme c'est le cas dans les marais desséchés de la côté Atlantique Française. Nous noterons donc l'importance du calendrier des opérations de mise en valeur lors de la reprise de terres sur la mer.

2 - Action sur le pH

Effets du chaulage

Les effets du chaulage sont très complexes et variables suivant les conditions de sol ; il ne paraît pas qu'une règle générale puisse être établie en ce qui concerne l'opportunité d'un tel amendement. Ceci provient du fait que le pH règle dans une certaine mesure la disponibilité des éléments chimiques pour les plantes :

- Par exemple dans le cas des toxicités (Al - Mn) dues à une acidité trop forte le chaulage provoquera une insolubilisation partielle de ces composés et aura par conséquent une influence profitable sur les rendements.
- De même le chaulage peut faciliter l'absorption du phosphore par les plantes en diminuant sa fixation par le fer. Le molybdène, difficilement assimilables en condition trop acide peut également être rendu accessible aux plantes par chaulage.
- Dans certains cas d'acidité extrême les concentrations en calcium échangeable du sol sont si faibles que des apports même très minimes de chaux ou de calcaire auront une action relativement importante sur les rendements. Le calcium joue ici un rôle nutritif d'autant plus important que la plante est plus exigeante en cet élément (arachide au Niari).
- Dans d'autres cas l'apport de chaux peut rétablir un équilibre cationique du sol qui était précédemment en défaveur de l'ion calcium.
- Enfin le chaulage, en accélérant les échanges biologiques au sein de la matière organique peut augmenter la quantité de nitrates disponibles pour la plante.
- Par contre un chaulage trop abondant peut provoquer des carences en bore, fer ou manganèse par insolubilisation de ces éléments. Il peut déséquilibrer le sol au détriment du potassium ou du magnésium et également diminuer rapidement le stock de matières organique.

Détermination des besoins

La pratique du chaulage sous les tropiques a souvent donné des résultats négatifs car on ne considérait pour déterminer les besoins que la réaction du sol. Il faut également tenir compte de la nature du complexe, de son taux de saturation et également de la nature des cations fixés. C'est ainsi que l'on doit séparer les conditions de sols à dominante sableuse (plus de 70 % de sables fins et grossiers) de celles des sols à tendance argileuse (plus de 40 % d'argile).

- Sols sableux à sablo argileux : La corrélation entre le pH et le degré de saturation est généralement bonne. F. DUGAIN a montré, à la suite d'expériences en champ, que l'on pouvait calculer assez précisément les quantités d'amendements à apporter à la couche de terre utile aux bananiers ; un essai fait en Guinée sur sol sablo-argileux donne les résultats suivants : avec 5,4 t/ha/an de carbonate de chaux pH passant de 4,5 à 6,15 ; de 4,5 à 6,75 avec 4 t/ha/an de magnésie calcinée (MgO) ; de 4,5 à 6,60 avec 2,7 t/ha/an de carbonate de chaux et 2 t/ha/an de magnésie calcinée ; la saturation du complexe variait de 80 à 100 %. Corrélativement il a été observé que les apports provoquaient une baisse notable des teneurs en humus (alors que les témoins, non amendés, accusaient une augmentation de 0,5 %), un amendement brutal accélère la minéralisation des matières humiques. Une autre constatation fut faite après arrêt de tout apport calcique ou magnésien : la désaturation se produit très rapidement avec une baisse de pH de 1,5 à 2 unités en deux ans.

Ceci prouve la nécessité de pratiquer des amendements progressifs sur de tels sols, l'intérêt d'apporter simultanément de la matière organique, et enfin l'obligation de poursuivre l'opération d'amendement, le lessivage des bases tendant à ramener celles-ci aux niveaux antérieurs. Ces études, il est vrai, ont été faites en Guinée, pays où les hivernages sont particulièrement pluvieux.

Sur les sols sablo-argileux, communs dans l'Ouest africain (bas-fonds de moyenne-Guinée; zone côtière, région d'Azaguié et d'Agboville en Côte d'Ivoire), on peut calculer les doses d'amendements d'après la capacité d'échange exprimée en milliéquivalents et le coefficient de saturation. Toutefois il faut être prudent ; F. DUGAIN a donné un exemple de plantation dont le sol possédait 10,6 méq % de capacité d'échange, saturé seulement à 22 % (pH - 4,5) ; si on avait voulu saturer seulement 30 cm superficiels -(environ 4 500 t/ha de terre), il aurait fallu près de 12 t de CaO/ha, environ 35 t de carbonate. Il est alors conseillé d'épandre 2 à 4 t de carbonate annuellement, et de suivre par analyse l'effet progressif.

- Sols argileux : Quand il s'agit de sols argileux, le problème de l'amendement devient plus complexe. La relation entre le pH et le degré de saturation peut devenir moins évidente.

Les différents produits.

On en distingue deux grandes catégories : les produits cuits et les produits crus.

Les produits cuits.

C'est-à-dire les chaux proprement dites : ils apportent le calcium sous forme d'oxyde de calcium (CaO - chaux vive) ou d'hydrate de chaux (chaux éteinte).

- Chaux vive en roches.- La cuisson du calcaire (CO_3Ca) dans le four à chaux fait disparaître le gaz carbonique (CO_2) et donne la chaux vive (CaO) qui se présente en morceaux à la sortie du four. Dosages variant de 75 à 95 % de chaux CaO suivant la pureté du calcaire utilisé.
- Chaux vive broyée.- Mêmes dosages.
- Chaux éteinte.- La chaux vive traité par l'eau s'éteint en donnant une poudre qui dose de 50 à 72 % de chaux CaO, sous forme d'hydrate.

- Chaux magnésiennes.- Vives ou éteintes, elles renferment au moins 10 % de magnésie (MgO). La magnésie joue dans le sol le même rôle que la chaux, en neutralisant comme elle l'acidité.
- Cendrées de chaux.- Fragments de chaux mélangés de cendre (5 à 10 %) passé à travers les grilles du four; dosant de 40 à 70 % de chaux CaO .

Les produits crus

Ce sont les calcaires broyés et différents autres produits de carrières. Le calcaire est rendu efficace par le broyage, à pousser d'autant plus que la roche est plus dure. La simple fragmentation suffit si la roche est très tendre (craie). On peut distinguer :

- Les calcaires broyés caractérisés par :
 - . leur teneur en chaux CaO : 45 à 56 % sous forme de carbonate ;
 - . leur finesse, exprimée par le numéro du tamis au travers duquel ils passent ;
 - . leur solubilité carbonique, indiquée par le pourcentage susceptible d'être dissous dans une eau chargée de gaz carbonique.
- Les craies tendres souvent très riches en CaO (après de 56 %). Certaines craies renferment du phosphate de chaux et sont alors dites phosphatées.
- Les calcaires magnésiens ou dolomies, association en proportions variables de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie.
- Les marnes, mélange naturel de calcaire et d'argile titrant en moyenne 25 % de chaux CaO . Leur valeur varie selon la rapidité avec laquelle elles se délitent à l'air.
- Les dépôts marins (maerl, trez) dosant de 25 à 40 % de CaO , utilisés encore en Bretagne.

Autres sources de calcium

- a) les amendements mixtes constitués d'un mélange en proportions variables de chaux et de calcaire broyé.
- b) les déchets de l'industrie tels que les "écumes de défécation", sous-produits de la fabrication du sucre.
- c) certains engrais minéraux et le plâtre peuvent apporter au sol du calcium, mais ne sont pas des amendements calcaires à proprement parler.

Choix de l'amendement

La nature du sol, le résultat recherché et le prix de l'unité CaO guideront l'agriculteur.

- En sol sableux les amendements d'action lente comme les marnes, les calcaires broyés seront préférables, tandis qu'en sol argileux on recherchera une action plus rapide en employant des chaux vives ou des calcaires finement broyés.

- Le prix de revient de l'unité CaO doit également être calculé. Par exemple pour apporter 1 000 Kg de CaO il faudra épandre 1 100 Kg/ha de chaux vive à 90 % de CaO ou 2 000 Kg/ha de calcaire broyé à 50 % de CaO. Cette teneur en élément utile est portée obligatoirement sur le sac ainsi que la composition de l'amendement, son origine géographique, sa finesse de monture. En outre il est important de faire préciser la "solubilité" carbonique du produit".

Pratique de l'amendement

- L'amendement sera d'autant plus actif qu'il sera intimement mélangé au sol par les labours ou pseudo labours. Toutefois il faut éviter de l'enfouir en même temps que les fumures organiques car il provoquerait une minéralisation rapide avec perte d'ammoniac. Il est également conseillé de chauler au moins un mois avant toute plantation.

- Nous avons vu que les quantités d'amendements à utiliser sont extrêmement variables suivant la nature physique du sol, son pH, et la nature de l'amendement choisi. Seul un laboratoire d'analyses connaissant bien les sols de la région pourra déterminer d'une façon précise le "besoin en chaux" d'un sol. Il conviendra de s'y référer autant que possible et d'établir ensuite un plan de chaulage.

- En matière de chaulage, il est préférable, et moins coûteux, de prévenir l'acidification, en intervenant avec des faibles doses, avant qu'elle ne soit très marquée, plutôt que d'y remédier lorsqu'elle est devenue extrêmement prononcée, ce qui exige de plus fortes doses d'amendements.

En effet, de fortes doses d'amendements sont susceptibles de provoquer une décomposition trop rapide des matières organiques et, d'autre part, les besoins annuels en chaux des terres à faible acidité étant peu élevés, des apports supérieurs aux besoins réels conduisent à un gaspillage de l'amendement apporté par suite de son lessivage par les pluies.

Pour ces raisons, la technique du chaulage doit tendre à des apports à faibles doses, ce qui conduit à en augmenter la fréquence.

- Exemples d'amendement en pays tropicaux.

. Malgré la teneur en argile des terres du Niari (65 à 75 % d'argile) (les besoins en chaux sont généralement proportionnels à la teneur en argile) les essais effectués par l'I.R.H.O. ont porté sur des doses effectivement faibles : maximum de 2 tonnes de chaux locale par an (= 1 500 Kg de CaO) dans le cas des terres à acidité extrêmement élevée (pH voisin de 4). Ces doses faibles ne sont révélées très efficaces, d'action rapide et d'une durée d'efficacité portant sur 4 cycles consécutifs (2 années d'observations actuellement).

. Actuellement, sur la Côte d'Afrique Occidentale, on utilise des chaux agricoles, des chaux magnésiennes, ou des calcaires dolomitiques ; l'introduction de la magnésie est due à son absence plus ou moins marquée qui est l'origine de déséquilibres (Bleu du Bananier). Les épandages sont

faits en début de plantation, avec enfouissage sur 10 à 20 cm, de façon à répartir l'amendement de façon homogène ; l'effet est alors plus rapide mais dépend également très largement des caractéristiques des produits, de leur solubilité carbonique et surtout de leur finesse de monture. Les essais de contrôle de Bleu, ont montré que l'action de la magnésie apparaissent en 3 ou 4 mois.

. En moyenne Casamance sur sols ferrugineux cultivés mécaniquement après défrichage de la forêt, la mise en culture provoque une baisse régulière du pH et du Ca échangeable des sols, de l'ordre de une unité en six ans pour le pH et d'un milliéquivalent/100 g de sol pour le calcium. FAUCK préconise soit le chaulage (400 kg de CaO/ha représente 0,5 méq de Ca échangeable) soit l'emploi de phosphates tricalciques naturelles à forte dose.

Au Congo la chaux n'est pas utilisée sur les sols ferrallitiques car :

- 1 - Elle est beaucoup trop coûteuse
- 2 - Elle reste sans succès
- 3 - Elle est dangereuse car elle détruit l'équilibre entre les éléments nutritifs : sur ces sols fortement lessivés et très faiblement tamponnés, l'absorption du K et du Mg par les plantes est déjà fortement diminuée par l'administration de très petites quantités de chaux, gypse ou superphosphate normal.

Le chaulage de ces sols acides ne sera indiqué que lorsqu'une carence en calcium comme élément nutritif des plantes aura fait son apparition. Dans ce dernier cas les quantités appliquées annuellement ne seront que faibles au maximum 500 kg CaO/ha.

C. LES AMENDEMENTS ORGANIQUES

Nous avons noté l'importance de la matière organique et de l'humus sur les qualité structurales des sols. En modifiant la teneur de ces éléments, leur qualité et leur répartition nous pouvons donc espérer améliorer sensiblement les facteurs physiques de la fertilité.

- Après incorporation la matière organique avant même le début de son évolution, peut si elle est bien répartie dans la masse du sol, favoriser la division des mottes et retarder l'apparition des prises en masse au cours de l'hivernage, et dans certains cas accélérer le ressuyage des terres.

- D'autre part ces éléments organiques, après avoir subi une certaine évolution leur permettant de se mélanger intimement à la partie minérale du sol, amélioreront la stabilité structurale. Les produits transitoires ont une action très marquée mais de durée assez courte. L'humus résiduel au contraire a une action plus faible mais de durée beaucoup plus longue grâce à sa relative stabilité biologique.

- Les taux d'humus indispensables pour maintenir le sol dans un état physique suffisamment favorable sont variable avec la texture du sol. C'est ainsi qu'une terre argileuse demandera des taux d'humus beaucoup plus élevés qu'un sol sablo argileux à argilo-sableux.

Cette influence favorable de la matière organique sur la stabilité structurale a été bien observée dans un essai d'épuisement de sol sous culture continue de coton à Bambari (Centrafrique) par COMBEAU. Les parcelles recevant régulièrement du fumier de ferme ont en moyenne un indice d'instabilité structurale meilleur que le témoin et les parcelles avec engrais.

CORRELATION ENTRE Is et C %
(Moyenne de 6 répétitions)

Traitement	Is	C %
Savane limitrophe	0,77	1,44
Parcelle avec fumier	1,19	1,42
Parcelle avec engrais	1,46	1,21
Témoin	1,91	1,14

Dans cet exemple l'amélioration de la stabilité structurale consécutive à un apport de matière organique est donc sensible d'autant plus

que l'essai n'est en cours que depuis trois ans.

Dans la vallée du Niger, dans des rizières en culture continue depuis vingt cinq ans, le paillage répété à amélioré sensiblement la perméabilité du sol, par contre l'indice d'instabilité très mauvais pour ce type de sol (Is de 3 à 4) ne varie pratiquement pas.

EFFET DU PAILLAGE SUR Is et K

Traitement	Is	K
Sans paille	3,2	1,1
	3,8	1,2
Avec paille	2,9	1,8
	3,5	2,6
	3,1	2,0

Il est donc important d'améliorer le capital organique du sol en enfouissant débris végétaux, fumier, compost, engrais vert, en vue d'obtenir des conditions physiques favorables.

Nous étudierons les diverses catégories d'apport organique dans le chapitre des fumures, mais disons tout de suite qu'elle n'ont pas toutes le même pouvoir d'accroître la teneur en humus du sol donc d'améliorer les propriétés physiques du sol.

Si le fumier, le compost, les pailles, enfin tous apports organiques relativement pauvre en azote et riche en matière cellulosique laissent un résidu humique appréciable il n'en est pas de même des engrais verts par exemple qui se décomposent très rapidement. Ces engrais verts non seulement sont incapables de maintenir ou d'accroître le taux de matière organique du sol mais contribuent également à la libération des éléments de l'humus stable du sol en activant la microflore. Il semble donc que les premiers produits auront un effet beaucoup plus durable sur les qualités physiques du sol par production d'humus, alors que les engrais verts agiront plutôt par la formation de produits transitoires très actifs mais de courte durée.

D. LES AMENDEMENTS SYNTHETIQUES

Certains produits synthétiques (polyacrilates, polyvinilites) à fort pouvoir adhésif ont le pouvoir d'agglomérer les particules fines des sols compacts et leur conférer une structure meuble et très stable car ces produits résistent aux actions microbiennes.

Pour les régions tropicales RIQUIER a obtenu de bons résultats avec le "Krilium" sur sol ferrallitique et sol ferrugineux (essais en pots) la structure de ces sols a été nettement améliorée ainsi que leur perméabilité :

- par augmentation des agrégats supérieurs à 2 mm
- par une proportion plus importante d'agrégats compris entre 0,2 et 2 mm résistants à l'eau
- par une diminution de l'argile facilement dispersable.

L'action de ces produits se résume au maintien des agrégats naturels ou fabriqués mécaniquement par un bon travail du sol. De plus si ces "conditionneurs du sol" peuvent remplacer l'humus comme stabilisant de la structure ils sont par contre incapable de jouer les autres rôles de l'humus en particulier comme source d'éléments minéraux.

Malheureusement le prix de ces produits est encore beaucoup trop élevé pour que l'on puisse envisager leur emploi dans la pratique agricole courante.

II. TRAVAUX CULTURAUX

Nous ne citons ici ces travaux que pour mémoire (se reporter au cours d'Agronomie Générale).

I LABOURS ET PSEUDOLABOURS -

Ces travaux ont entre autres pour but d'améliorer :

- la structure du sol
- la profondeur du sol accessible aux racines
- le profil hydrique du sol.

II ASSAINISSEMENT DES TERRES -

Irrigation

Drainage.

C H A P I T R E I I

A M E L I O R A T I O N S C H I M I Q U E S

INTRODUCTION

Les améliorations chimiques vont permettre de corriger et d'accroître les réserves naturelles du sol pour assurer aux cultures une nutrition optimale. Certes nous avons vu que les jachères, de longue durée, les restitutions végétales permettent de maintenir la fertilité naturelle mais à un niveau médiocre compte tenu des exigences économiques actuelles.

En pays tropicaux la Fertilisation revêt une importance particulière du fait non seulement de la pauvreté caractéristique de la plupart des sols mais également de leur appauvrissement extrêmement rapide par suite de la violence des phénomènes d'érosion et de lessivage.

L'apport d'éléments fertilisants a donc pour but :

- de compenser dans le sol la perte d'éléments nutritifs exportés par les produits végétaux, l'érosion ou le lessivage.
- de pallier dans le sol les déficiences préexistantes en éléments nutritifs et en assurer l'équilibre.

I. LOIS GENERALES DE LA FERTILISATION

Nous avons vu tout au long de ce cours la complexité des problèmes de fertilité, et ceci nous permet de comprendre qu'il ne peut exister de loi générale de la fertilisation au sens strict. Toutefois certains principes fondamentaux doivent guider l'agronome dans ce domaine.

A. PRINCIPE DE LA RESTITUTION

Il est évidemment nécessaire de restituer au sol les éléments fertilisants exportés si nous voulons maintenir la capacité de production du sol.

Toutefois ce principe est loin d'être suffisant :

- Il ne considère que la restauration de la fertilité naturelle et non son amélioration.
- L'utilisation, par les plantes, des éléments apportés n'est pas complète durant la saison de culture suivante. Le coefficient d'utilisation des engrais pour les sols tropicaux est de l'ordre de 50 % pour l'azote, 12 % pour le phosphate et 25 % pour le potassium.
- La seule restitution ne corrige pas les déséquilibres minéraux du sol qui sont fréquents sous les tropiques.

Il en résulte que si nous voulons améliorer la capacité de production de sol, il faut faire des apports supérieurs aux exportations. Cette idée encore assez vague va être précisée par les lois suivantes.

B. LOI DES FACTEURS LIMITANTS

Énoncée par LIEBIG cette loi est d'une importance capitale.

" L'importance du rendement obtenu est déterminée par l'élément qui se trouve en plus faible quantité relativement aux besoins des récoltes".

Si l'on applique cette loi au domaine de la fertilisation minérale nous pouvons dire que pour qu'un élément agisse il faut que les autres éléments soient disponibles pour la plante en quantité suffisante de telle façon que l'équilibre optimum nutritionnel soit réalisé.

Mais cette loi doit également être prise dans un sens beaucoup plus large, les facteurs limitants pouvant être tous les facteurs de productivité : culturaux, génétiques, climatiques et évidemment les facteurs de nutrition. Chacun de ces facteurs exerce une action déterminante sur les rendements il suffit que l'un d'eux joue dans le mauvais sens pour réduire l'efficacité de tous les autres (semis tardif pour le coton dans le Nord-Cameroun, traitement phytosanitaire négligé, variété locale à faible rendement etc...).

C'est ainsi que :

- L'application d'engrais ne produira un apport substantiel qu'avec des cultures en bon état ; les engrais ne remplacent pas d'autres pratiques agricoles, ils ne constituent qu'un aspect dans l'ensemble des techniques d'une bonne exploitation. Au Cameroun, par exemple, des parcelles de terrains sans engrais en culture cacaoyère, exploitées rationnellement (taille-traitement phytosanitaire - ombrage ...) ont donné 30 cabosses par arbre soit 1 kg de cacao sec marchand, c'est-à-dire plus d'une tonne à l'hectare. Lorsque l'on sait que le rendement moyen national se situe entre 300 et 400 kg à l'hectare il est inutile d'insister sur l'intérêt immédiat que peut présenter la simple mise en oeuvre d'une technique culturelle pourtant élémentaire.

Ce n'est qu'ensuite que pourra être envisagé une amélioration des rendements par l'utilisation notamment des engrais.

- Certaines plantes vivrières de base, vue la médiocrité du matériel végétal utilisé, sont génétiquement incapable de tirer un grand profit des engrais.

- L'eau, véhicule indispensable des éléments fertilisants peut, lorsqu'elle est en quantité insuffisante, restreindre l'efficacité des engrais et les possibilités d'alimentation des plantes, toutes choses étant égales par ailleurs. C'est pourquoi l'efficacité des engrais dépend, dans une grande mesure, du régime pluviométrique. Lorsqu'un élément majeur manque dans les sols d'une région, recevant des précipitations irrégulières d'une année sur l'autre, l'effet de l'engrais qui apporte cet élément est très variable. Il est en général très important lorsque les précipitations ont été correctement réparties, il est très faible lorsque les périodes de sécheresse ont été intenses ou que les précipitations tout en étant abondantes ont été très mal distribuées.

Il sera donc nécessaire d'effectuer les essais d'engrais pendant plusieurs années avant de tirer des conclusions.

C. LOI DES EXCEDENTS MOINS QUE PROPORTIONNELS

A condition de respecter l'équilibre de la nutrition minérale et les autres facteurs de la fertilité étant supposés non limitants peut-on augmenter indéfiniment les rendements des récoltes. MITSCHERLICH étudiant ce problème est arrivé à la conclusion suivante :

- Lorsque l'on apporte des doses croissantes d'engrais les augmentations de récolte obtenues sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les doses s'élèvent.

Il existe donc un rendement maximum théorique que l'on ne peut dépasser.

De plus cette loi nous montre qu'au-dessus d'un certain seuil les accroissements de rendement sont trop faibles pour rentabiliser les frais de fumure. Le rendement maximum économique peut de ce fait être très différent du maximum théorique.

En particulier dans les pays tropicaux on pouvait craindre que les fumures minérales soient difficilement rentables, ceci pour plusieurs raisons :

- Revenu brut à l'hectare faible
- Sols très pauvres donc demandant de fortes doses d'engrais.
- Prix de ces engrais élevé (frais de transport important).

Heureusement les premières expériences ont rapidement démontré que des doses très faibles d'engrais minéraux de l'ordre de 100 à 150 kg à l'hectare étaient suffisantes. Cela résulte des caractéristiques principales de la majorité des sols tropicaux.

- Le complexe absorbant possède une faible capacité de rétention, l'argile étant en général du type kaolinitique, et les teneurs en matières organiques basses.

- Dans les couches superficielles (0,50 cm) les réserves en bases échangeables sont généralement pauvres (lixiviation).

Ces deux caractéristiques expliquent :

- Les réponses souvent spectaculaires aux engrais minéraux (carences accentuées)
- Les réponses à de très faibles doses de fumure (100 à 150 kg/ha pour l'arachide par exemple) puisque contrairement à ce qui se passe en zone tempérée, la saturation du complexe absorbant est réalisée par de faibles apports d'engrais. Les doses efficaces sont nettement plus faibles que celles auxquelles on est accoutumé en zone tempérée (20 à 100 unités de P_2O_5 à l'ha, contre 30 pour l'arachide au Sénégal).

II. DETERMINATION DES BESOINS

L'agronome dispose actuellement de nombreuses méthodes de déterminations des besoins du complexe sol-plante très différentes dans leur principe, leurs possibilités d'application et la valeur des résultats obtenus.

- L'analyse de la plante permet de connaître les besoins du végétal.
- L'analyse du sol a pour but de rechercher les causes des déséquilibres ou des déficiences marquées et les possibilités d'y remédier.
- L'expérimentation permet de tester les résultats obtenus par les méthodes précédentes ou, intégrant tous les facteurs de la fertilité, de mettre en évidence les facteurs limitants.

A - L'ANALYSE DE LA PLANTE

Pour connaître les besoins de la plante il est nécessaire d'en faire l'analyse afin d'estimer les quantités d'éléments minéraux absorbés. Pour les cultures annuelles il est possible d'effectuer des analyses globales, pour les cultures pérennes des analyses d'une partie du végétal ont été mise au point.

Dans le plus grand nombre de cas l'analyse de la feuille (diagnostis foliaire) à son état de développement complet mais ne montrant encore aucun signe de sénescence et prélevée dans des conditions toujours identiques, donne les meilleurs résultats. Pour certaines plantes néanmoins certains auteurs ont démontré que d'autres analyses pouvaient être aussi favorables (lait de la noix de coco, composition du latex de l'hevéa etc).

Il faut toutefois souligner que le diagnostic de tout ou partie de la plante ne permet pas de tirer immédiatement des conclusions en vue de la fertilisation.

Les spécialistes comparent les teneurs avec celle d'une plante normalement alimentée ou donnant de haut rendements. Ils définissent également un certain pourcentage de l'élément considéré dans l'organe prélevé au-dessus duquel la fumure ne donne plus de résultats pratiques et en dessous duquel il y a carence. C'est ce qu'on appelle le "niveau critique".

Si dans certains cas bien étudiés la comparaison de ces niveaux critiques avec ceux fournis par les analyses donne des indications immédiates quant aux besoins de la plante il faut rester très prudent quant à la fumure à appliquer.

En effet les nombreuses interactions entre les divers éléments peuvent faire varier leur comportement et leur teneur. C'est ainsi qu'une carence apparente en Mg peut être induite par un excès relatif de K apporté par les fumures et inversement. Dans ce cas on n'essaiera pas de corriger la carence mais on supprimera ou réduira l'apport de l'élément en excès.

D'autre part le taux d'éléments minéraux varie avec les conditions atmosphériques. Les prélèvements se font à la même phase végétative qui peut avoir lieu pendant une période plus ou moins sèche, ou plus ou moins chaude, suivant les années. Il faudra donc bien étudier les facteurs du milieu avant de prendre une décision quant à la fumure.

Enfin le diagnostic renseigne sur les besoins de la plante et non du sol. La fumure économique ne doit fournir à la plante que le complément alimentaire destiné à suppléer aux insuffisances du sol, en particulier dans les pays tropicaux où la rentabilité de la fumure conditionne son expansion.

En résumé les méthodes de diagnostic par analyse des plantes doivent être utilisées avec prudence et testées par des expérimentations très précises. Elles ont par contre une application de plus en plus large en agronomie. En particulier ces analyses ont un grand intérêt dans l'établissement de cartes des déficiences minérales.

B - ANALYSE DU SOL

Le problème d'analyse des sols présente de multiples aspects d'ordre théorique ou pratique. Nous en avons déjà étudié quelques uns dans les chapitres précédents et dans le cours de Pédologie. Nous n'aborderons ici que les aspects d'ordre pratique.

Il est important par exemple, pour un exploitant agricole, de savoir dans quel cas il sera utile pour lui de faire procéder à une étude analytique de son terrain. Il doit être informé également de ce qu'il peut raisonnablement en attendre dans l'état actuel de nos connaissances sur les sols tropicaux. Il ne doit pas ignorer enfin que sa contribution dans ce domaine peut être importante au stade du prélèvement des échantillons de terre et de l'établissement des fiches de renseignements.

1) - Utilité des analyses de sol

Nous avons vu que les déterminations de la texture et de la stabilité structurale sont susceptibles d'expliquer certains cas de faibles rendements. Dans d'autres cas c'est le dosage de la matière organique ou des éléments minéraux nutritifs (N, P_2O_5 , K_2O , Ca, Mg) qui se révélera le plus utile. Parfois c'est la capacité d'échange, le pH ou le pouvoir fixateur à l'égard du phosphore qu'il faudra connaître. C'est à l'agronome responsable du laboratoire d'analyse qu'il appartient de décider au vue des renseignements fournis par l'agriculteur, quelles sont les analyses à effectuer dans chaque cas particulier.

On pourrait donner de nombreux exemples concrets ; nous n'en retiendrons que quelques uns particulièrement typiques.

- Dans la vallée du Sénégal on constate fréquemment des différences importantes de rendement du sorgho en culture de décrue. Or on a pu montrer qu'avec des pratiques culturales identiques, le rendement augmente régulièrement lorsque la teneur en argile augmente elle-même, ceci n'étant plus valable lorsque la teneur dépasse 40 % ; le simple dosage de l'argile peut donc renseigner utilement sur le choix d'un terrain susceptible d'assurer de meilleurs rendements qu'un autre.

- Sur les sols ferrallitiques de République Centrafricaine on a pu mettre en évidence une corrélation entre les rendements et la valeur de I_s : lorsque cet indice augmente les rendements diminuent ; l'analyse montre aisément que lorsque sa valeur dépasse la valeur de 1 il faut laisser le sol se régénérer pour la mise en jachère.

- Les sols à arachide du Sénégal sont d'autant plus productifs que leur teneur en phosphore est plus élevée ; comme la carence en phosphore est très fréquente, il y a donc de fortes chances pour que le dosage de cet élément oriente efficacement le cultivateur vers l'utilisation de la fumure phosphatée.

Les exemples précédents ne doivent cependant pas pousser l'utilisateur à un optimisme excessif. La plupart des informations que l'on retire des résultats analytiques sont d'ordre qualitatif ; mais l'agronome qui interprète ces résultats n'est pas encore en mesure, du moins en pays tropical, de formuler des recommandations d'ordre quantitatif ; on peut par exemple facilement montrer qu'un sol est trop pauvre en azote, phosphore ou potassium et qu'il faut lui apporter des engrais azotés, phosphatés ou potassiques, mais il est encore difficile de dire, au seul examen du bulletin d'analyse, quelle dose d'engrais il faut apporter à l'hectare, or c'est précisément ce qui intéresse l'agriculteur.

Faut-il en conclure que l'analyse ne présente pour lui aucun intérêt ? En réalité on est encore au stade où cette analyse devrait presque toujours être complétée par l'expérimentation. L'exploitant qui a le souci de bien gérer sa plantation peut en tirer un réel profit : le spécialiste de la recherche agronomique attache de son côté beaucoup d'importance à pouvoir disposer d'un terrain sur lequel il pourra étalonner ses méthodes de dosage et établir des échelles de fertilité. On dispose souvent de telles échelles de fertilité dans les pays à agriculture intensive ; elles ont été établies peu à peu à la suite de nombreuses analyses et expérimentations et on en est arrivé maintenant dans ces zones au stade où l'analyse suffit. C'est vers ce but qu'il faut tendre dans les pays où l'agriculture ne connaît pas encore ce caractère intensif.

2 - Prélèvement des échantillons

La valeur de l'analyse chimique d'un sol dépend avant tout du prélèvement de l'échantillon. Celui-ci en effet doit refléter aussi exactement que possible les conditions naturelles. Les données statistiques obligent pour cela à prélever un grand nombre d'échantillons élémentaires.

Nombre de prélèvements élémentaires

Dans la pratique on peut se limiter entre 20 et 25 prélèvements élémentaires pour donner l'échantillon final : ce nombre de prélèvements est valable pour une surface qui ne doit pas dépasser 1/4 ha.

Si la surface à étudier est plus grande ou si l'on veut comparer entre elles plusieurs parcelles, augmenter le nombre d'échantillons à analyser, en faisant toujours pour chacun d'eux 20 à 25 prélèvements élémentaires.

Profondeur de prélèvement

Le principe est de prélever tout l'horizon humifère (ou l'horizon de travail) du sol : celui-ci peut avoir une épaisseur variable selon les régions.

Dans le Sud-Cameroun, en forêt on peut prélever l'horizon 0 - 10 cm, et en savane l'horizon 0 - 15 ou 0 - 20 cm.

Dans le Nord-Cameroun l'horizon 0 - 10 cm est suffisant.

Ces chiffres sont des ordres de grandeur qui peuvent varier dans les cas particuliers.

Mode de prélèvement

Le plus simple est d'utiliser une bêche et de faire de petits trous de la profondeur voulue : prélever une tranche de terre de l'épaisseur désirée.

Echantillons final

Ramener tous les échantillons élémentaires dans un endroit propre et bien mélanger le tout jusqu'à homogénéisation complète et enlever la plus grande partie des racines et débris végétaux : l'échantillon final est mis dans un sac en toile ou en polyéthylène et doit représenter au minimum un kg de terre.

Prélèvement du sous-sol

Il peut être intéressant de prélever un échantillon du sous-sol, quand ce dernier diffère fortement de l'horizon humifère par sa texture (quand il devient nettement plus argileux ou plus sableux) ou par sa structure (quand il devient plus compact).

La profondeur du prélèvement est évidemment variable, mais doit être généralement compris entre 20 et 60 cm : faire le prélèvement dans une zone homogène de 10 à 15 cm d'épaisseur.

Envoi des échantillons

Il y a intérêt à envoyer le plus rapidement possible les échantillons au Laboratoire, après les avoir soigneusement étiquetés à l'intérieur et à l'extérieur du sac et en joignant obligatoirement une fiche de renseignements contenant les indications suivantes :

- Nom et adresse de l'expéditeur (agent de l'Agriculture, des S.E.M. etc...)
- Date du prélèvement
- Localité
- Arrondissement
- Département
- Emplacement dans la localité
- Nom du planteur (éventuellement)
- Numérotage et profondeur des prélèvements
- Végétation : cultures, plantations (noter l'ombrage)
· jachère, forêts, savanes, etc.
- Rendements obtenus (éventuellement)
- Fumure organiques et minérales antérieures (éventuellement)
· avec quantités et dates d'épandage.
- Observations diverses : présence de latérite, de rocher, d'eau à faible profondeur etc.
- Questions auxquelles doit répondre l'analyse :
mauvais rendement, malformation des arbres ou des plantes, choix d'un terrain à caféier, cacaoyer ou coton, etc.

3 - Interprétation des résultats

La difficulté majeure est de déterminer la partie des éléments minéraux du sol qui sont disponibles immédiatement ou à court terme pour la plante.

Le choix des extractifs chimiques pour les éléments majeurs dits "assimilables" est maintenant assez bien réalisé suivant les types de sol envisagés (voir le cours de pédologie). Mais ces déterminations restent statiques, aussi depuis quelques années différents auteurs cherchent à compléter ces résultats par des méthodes permettant d'apprécier la vitesse de diffusion de ces éléments du complexe absorbant vers la solution du sol (voir méthode BLANCHET pour le phosphore).

Toutefois les réactifs restent toujours empiriques et n'imitent certainement pas la souplesse d'absorption des racines. Il est alors nécessaire d'établir des corrélations avec les résultats obtenus par telle méthode bien définie et les rendements de très nombreux champs d'expériences.

Enfin le dosage isolé d'un élément n'a souvent aucun sens car les interactions sont nombreuses et leurs connaissances (revoir la fertilité naturelle) est d'une importance capitale pour établir un plan de fumure.

Conclusion

L'analyse des sols tropicaux n'est pas encore une technique suffisamment élaborée pour que l'utilisateur puisse en attendre une solution définitive à tous ses problèmes. En particulier en matière de fertilisation elle doit être complétée par l'analyse de la plante et l'expérimentation. Il faut cependant porter à son actif le fait que bon nombre de déterminations, soigneusement choisies, sont susceptibles de renseigner utilement l'exploitant sur la fertilité de ses terres et les possibilités de les améliorer.

C. L'EXPERIMENTATION

Nos connaissances actuelles sur la dynamique des sols tropicaux et sur la physiologie des plantes que l'on y cultive sont encore insuffisantes pour que l'on puisse se limiter à la méthode analytique. L'expérimentation est donc indispensable. C'est certes une technique délicate, longue et coûteuse mais elle se révèle très efficace lorsqu'elle est bien conduite.

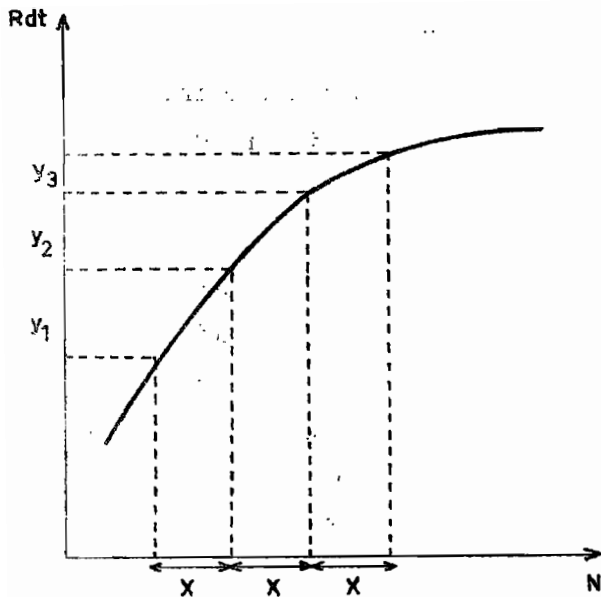
1 - Méthodes de base

La méthodologie s'élabore peu à peu, elle a définitivement adopté les méthodes statistiques d'analyses des résultats, mais ses principes et sa planification sont encore l'objet de controverses et il existe en matière de fertilisation au moins trois groupes fondamentalement différents de méthodes.

Méthode de MITCHERLICH. Le principe essentiel est l'étude d'un seul facteur à la fois les autres étant maintenus constant ; on porte d'ailleurs généralement ces derniers facteurs à un niveau suffisant pour qu'ils ne soient pas facteur limitant. Ces méthodes présentent l'avantage d'être simples et elles donnent une solution satisfaisante au problème de la fumure lorsqu'un seul élément est facteur limitant. On peut leur reprocher cependant de ne pas tenir compte des interactions entre facteurs et des équilibres à réaliser entre les éléments lorsque l'on doit se contenter de fumure modérées, faute de pouvoir atteindre d'emblée la fertilité potentielle ; or c'est précisément le cas en région tropicale sauf pour les cultures très riches.

La méthode est une application de la loi de "décroissance des excédents de rendement".

"Si on étudie la variation du rendement en fonction des quantités croissantes d'un facteur isolé on obtient en général une courbe montrant que le rendement n'est pas proportionnel à la quantité apportée".



A des accroissements égaux de X correspondent des excédents Y_1, Y_2, Y_3 de plus en plus faibles au fur et à mesure que la récolte est plus proche de son maximum.

La courbe dans sa partie ayant un intérêt pratique peut être confondue avec une tranche de parabole ou d'hyperbole au moyen de 2 paramètres.

MITSCHERLICH fait intervenir le rendement maximum A susceptible d'être atteint quand on fait croître le facteur x considéré et il admet que l'accroissement dy du rendement résultant d'un accroissement dx est proportionnel à l'augmentation restant possible c'est-à-dire $(A - Y)$.

$$D'où \frac{dy}{dx} = (A - y)C$$

et par intégration

$$\text{Log}(A - y) = -cx + C^{\text{ste}}$$

Si b représente la quantité de l'élément considéré présent dans le sol et Y_0 le rendement obtenu en présence de b seul.

La formule devient :

$$L(A - Y) = L(A - Y_0) + c(b - x)$$

c = Coefficient d'efficacité spécifique du facteur étudié. D'après MITSCHERLICH c serait constant si les autres facteurs sont à leur optimum ; les valeurs de c ont été déterminées expérimentalement.

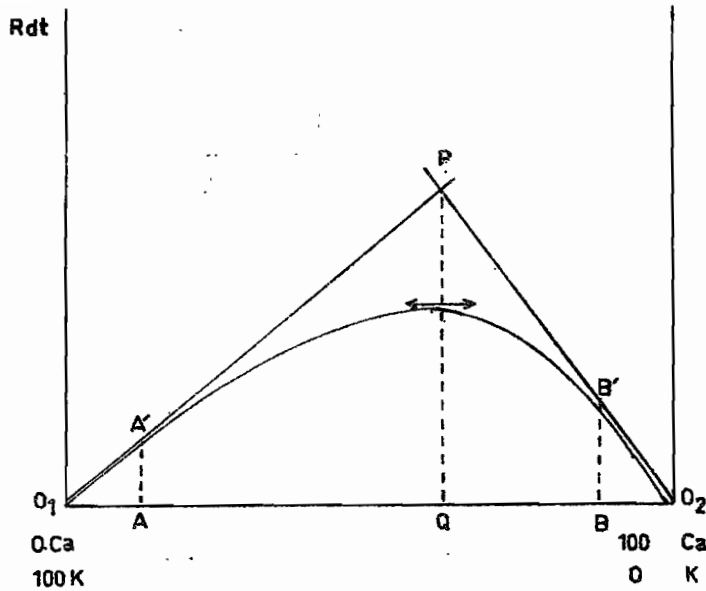
La formule de MITSCHERLICH, dans de nombreux cas et aussi pour d'autres facteurs de croissance (lumière, eau ...), s'accorde bien avec les faits d'observations. Elle permet une détermination quantitative des réserves

du sol et de l'accroissement de rendement à attendre d'un apport déterminé d'un élément. Toutefois elle ne semble valable que pour des conditions de croissance idéales rarement réalisées dans la pratique.

Méthode Factorielle. Cette méthode préconise l'étude simultanée du plus grand nombre possible de facteurs à la fois ; le type en est la méthode factorielle, qui présente l'avantage incontestable de permettre le calcul des interactions de divers ordre entre les facteurs mis à l'étude. Les progrès réalisés dans l'élaboration de plans expérimentaux, de plus en plus perfectionnés lui confèrent maintenant de très larges possibilités d'utilisation. (Voir le cours de statistiques).

Méthode d'HOMES. Enfin, le troisième groupe est celui des méthodes à somme constante, dont le type est la méthode Homès ; elle est essentiellement basée sur la notion d'équilibres alimentaires. Ces travaux ont établi l'importance des concentrations relatives entre éléments anioniques et éléments cationiques, l'existence d'optima, à l'intérieur d'une somme constante, entre deux ou trois éléments d'un même groupe l'indépendance, dans une large mesure, des équilibres entre ces deux groupes et enfin l'influence sur le développement des végétaux du rapport somme des anions--sommes des cations. Son originalité a suscité beaucoup d'intérêt et elle s'est révélée efficace dans plusieurs cas d'étude de l'alimentation minérale de plantes tropicales en culture sans sol ; son application en agronomie exige une adaptation qui a été obtenue de façon différente par RICHARD et par HOMES lui-même ; mais il reste à confirmer la validité de cette adaptation. On peut lui faire grief de reposer sur certaines hypothèses contestables, telles que l'indépendance des anions et des cations, et aussi d'exiger la mise en oeuvre de mélanges complexes inhabituels pour la confection des équilibres entre les éléments étudiés.

La courbe de rendement d'un végétal en milieu artificiel, établie en fonction des concentrations relatives de deux cations ou de deux anions, se présente sous une forme convexe, elle s'annule à ses deux extrémités correspondant à l'absence de l'un des deux éléments.



Au maximum de la courbe de rendement correspond en abscisse une proportion optimum Q entre les deux éléments considérés.

La méthode des variantes systématiques permet de déterminer ce maximum.

Soit A et B, deux points de l'abscisses situés à égale distance et à proximité des origines O1 et O2, ces deux points correspondent à des concentrations relatives telles que K = 80 %, Ca = 20 % et K = 20 %, Ca = 80 %. Le caractère systématique du choix de ces variantes a donné le nom à la méthode. Aux deux concentrations relatives choisies, correspondent deux points, A' et B', sur la courbe de rendement, ils sont obtenus expérimentalement. L'abscisse du maximum de la courbe sera avec une approximation celle du point de rendement rencontre P des sécantes O1 A' et O2 B'.

L'abscisse du point Q est déterminée géométriquement par les relations suivantes :

$$\frac{O1 Q}{O2 Q} = \frac{A A'}{B B'}$$

$$O1 Q + O2 Q = 100$$

A A' et B B' sont les deux rendements obtenus par les deux concentrations relatives inverses considérées.

$$O1 Q = \frac{A A' \times 100}{A A' + B B'}$$

$$\text{proportion de l'ion K} = \frac{\text{rendement K} \times 100}{\text{rendement K} + \text{rendement Ca}}$$

L'équilibre ternaire N - P - S ou K - Ca - Mg s'étudie d'une façon identique mais on coordonne les points triangulaires.

Les coordonnées de cet optimum sont obtenues en appliquant la formule suivante :

$$\text{proportion de l'ion N} = \frac{\text{rendement N} \times 100}{\text{rend. N} + \text{rend. P} + \text{rend. S}}$$

Les rendements N, P et S étant obtenus en des points symétriques.

Pour étudier l'alimentation minérale d'un végétal en milieu artificiel, on réalisera 6 formules nutritives, toutes complètes, en ce qu'elles comprennent les 6 éléments à étudier mais en proportions différentes. Les proportions seront par exemple les suivantes :

N° du	Syn-bole	Composition anionique			Composition cationique		
		N	S	P	K	Ca	Mg
1	N	80	10	10	40	30	30
2	S	10	80	10	40	30	30
3	P	10	10	80	40	30	30
4	K	40	30	30	80	10	10
5	Ca	40	30	30	10	80	10
6	Mg	40	30	30	10	10	80

Les traitements 1, 2 et 3 étudient l'équilibre optimum à respecter entre anions.

Les traitements 4, 5 et 6 étudient l'équilibre optimum à respecter entre cations.

Les éléments sont toujours exprimés en équivalents.

Dans le tableau ci-après, le rapport somme des anions somme des cations est égal à 1. L'expérience a établi que la valeur de ce rapport influe considérablement sur le rendement, bien que l'équilibre optimum défini à l'intérieur des deux groupes soit dans une large mesure indépendant de ce rapport.

Cette méthode, mise au point en culture artificielle ne peut être appliquée au milieu naturel sans modification.

2 - Pratique de l'expérimentation

Le premier point important en expérimentation est le choix de la méthode de la mieux adaptée aux problèmes à résoudre.

Un autre aspect important de la méthode expérimentale, en matière de fertilisation, est celui du déroulement de l'expérimentation dans le temps. A ce sujet on peut distinguer trois phases :

Recherche des facteurs limitants

La détection des facteurs limitants de l'alimentation minérale de la plante fait appel à des méthodologies variées factorielles ou sous-tractives.

La méthode soustractive consiste à étudier expérimentalement la réaction du végétal en présence d'une fumure complète ou carencée en un élément. Elle est souvent préférée à la méthode factorielle car elle comporte moins d'objets à expérimenter : dans le cas de 4 éléments elle comprend 6 objets au lieu de 16. Ces méthodes peuvent être utilisées soit en vase de végétation, soit en plein champ. Le premier procédé à l'inconvénient majeur de s'adresser à un milieu quasi artificiel dans lequel le comportement des végétaux peut être assez différent de celui qu'il aurait en plein champ.

Enfin les essais soustractifs au champ ont l'avantage de pouvoir être suivis plusieurs années consécutives donc de permettre l'étude de l'évolution de tel ou tel sol sous une rotation culturale déterminée.

Détermination de l'équilibre optimal entre les éléments

Méthodes des "coupes" : elle est basée sur le principe de la méthode d'HOMES et se propose de déterminer les proportions relatives des éléments de la fumure correspondant à l'optimum de rendement.

On étudie expérimentalement la réaction du végétal à deux éléments choisis N et P par exemple. Les résultats obtenus sont représentés sur un graphique à trois dimensions : les valeurs de N et P sont portés sur deux axes de coordonnées rectangulaires ON et OP et le rendement correspondant sur une perpendiculaire au plan défini par les axes ON et OP. On obtient aussi une surface de réponse aux éléments considérés. En coupant cette surface de réponse par des plans perpendiculaires au plan NOP on obtient des courbes traduisant les variations de rendement lorsque les quantités relatives des éléments N et P varie.

Cette méthode a montré qu'il existe une relations simple entre les deux éléments qui reste valable lorsque la quantité globale de fumure apportée varie.

Détermination de la fumure optimale

La détermination quantitative de la fumure fait également appel à des techniques expérimentales diverses.

Courbe de réponse : par cette technique l'expérimentation se propose d'établir la courbe continue de l'élévation de fertilité du sol en fonction d'une des variables de la nutrition les autres éléments étant portés à un niveau suffisamment élevé pour n'être pas limitant.

Des courbes de ce genre ont été établies pour les éléments majeurs N, P, K et parfois Ca et Mg.

Dans bien de cas il serait anti-économique, du fait du prix élevé des engrais d'amener d'emblée le sol à sa fertilité potentielle. Mais il est possible de prévoir d'après les courbes, les fumures correspondant à l'optimum économique. Les courbes de rendements s'écrasant fortement vers les fortes doses on peut obtenir de 50 à 80 % du rendement maximum avec des fertilisations beaucoup moins élevées que celles nécessaires à l'obtention de ce maximum.

L'idée directrice de cette méthode repose sur la distinction entre fumure de redressement et fumure d'entretien.

Méthode factorielle : dans certains cas on recherche directement par des essais factoriels la composition optimale de la fumure. La mise au point des fertilisations minérales pour l'arachide a été faite par cette méthode.

Confirmation régionale et vulgarisation

Après avoir mis au point la fumure optimale adaptée aux déficiences diagnostiquées dans la phase initiale il faut établir une formule moyenne pour tenir compte des possibilités du cultivateur et de tous les éléments entrant en jeu dans le développement agricole d'une région. Il faut en effet limiter le plus possible le nombre de formules d'engrais. Il est difficile d'envisager la formulation d'un engrais qui ne sera commercialisé qu'à quelques centaines de tonnes. Enfin il faut autant que possible faire appel à des engrais simples se trouvant sur le marché. Lorsqu'une formule moyenne sera trouvée, il faudra l'expérimenter pour juger de sa validité et amorcer la vulgarisation.

Les essais devront donc s'adapter à ce double but ; confirmation et vulgarisation. Ils n'auront qu'un petit nombre d'objets à comparer : la formule choisie et le témoin. La méthode des "blocs dispersés" convient très bien pour ce genre d'essais dans lequel chaque démonstration constitue un bloc. Ces essais répartis sur une vaste région naturelle devront comporter 10 à 15 emplacements pour donner une information rigoureuse de la formule proposée.

III - LES DIFFERENTS ENGRAIS

Les engrais, source d'éléments minéraux pour la nutrition des plantes, sont de nature soit organique soit minérale. Nous étudierons globalement les premiers, par contre pour les seconds nous les classerons en plusieurs catégories basées sur l'élément chimique principal contenu dans cet engrais. Enfin nous traiterons à part les éléments minéraux mineurs (oligo-éléments) qui se trouvent inclus soit dans des mélanges spéciaux soit dans les engrais cités précédemment.

A. LES ENGRAIS ORGANIQUES

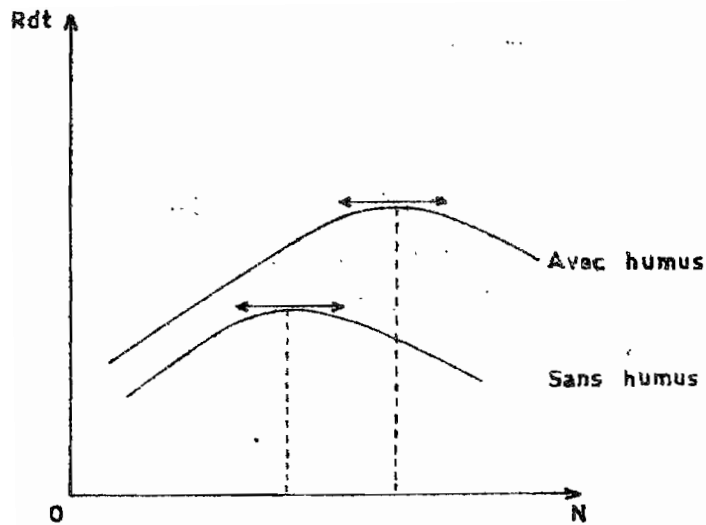
1) Généralités

La matière organique constitue un élément important de la fertilité, en mettant à la disposition de la plante tous les éléments nutritifs, souvent sous une forme plus assimilable. Un apport de 15 tonnes de fumier à l'hectare représente plus d'azote, de phosphore et de potassium que les plus fortes fumures minérales actuellement utilisées.

En plus de cet apport important d'éléments nutritifs l'humus semble jouer un rôle favorable sur l'absorption de certains éléments par la plante.

C'est ainsi que CHAMINADE a montré sur culture en solutions nutritives que :

- La présence d'humus accroît dans une large mesure le rendement maximum obtenu.
- La dose optimum d'azote dans les solutions nutritives sans humus se situe au voisinage de 40 mg par litre. Au-delà le rendement plafonne puis décroît par suite de phénomène d'intoxication.



En présence d'humus au contraire des doses d'azote inutiles ou toxiques dans les solutions sans humus deviennent utilisables pour le végétal dont le rendement continue à croître avec la concentration en azote.

POMOT et LECAT ont montré qu'il en était de même pour la nutrition phosphatée.

2) Les déchets de récolte

L'utilisation de ces matières, produites sur place ou dérivant de l'usinage des récoltes, peuvent être d'un grand profit en évitant l'achat d'éléments chimiques d'origine industrielle d'un prix élevé.

Le tourteau de coton est un engrais organique relativement concentré. Il contient en moyenne : 6 à 7 % d'azote, 2 % de P_2O_5 , 1 à 2 % de K_2O .

L'hullerie CFDT de Kaélé peut mettre chaque année à la disposition des cultivateurs environ 3 000 t de tourteaux qui permettraient de fumer environ 10 000 ha aux abords de l'usine de Kaélé à raison de 300 à 500 kg/ha épandus pour la culture de coton.

La graine de coton broyée pourrait être obtenue dans les usines d'égrenage de la CFDT autres que celle de Kaélé les graines n'y étant pas utilisées en hullerie.

Les frais occasionnés par le broyage des graines et leur transport aux lieux proches d'utilisation sont relativement peu élevés en tenant compte de l'amélioration apportée.

Sur culture de coton l'épandage au démarrage de 500 à 1 000 kg/ha de graines de coton broyées augmente les rendements de 15 à 25 %.

Résidus de criblage.

On a pensé relever le niveau de fertilité des sols au Sénégal en faisant un apport de 25 t/ha de résidus de criblage sur arachides. Les résultats immédiats furent excellents mais au bout de trois cultures l'effet de l'enfouissement avait disparu.

Les coques d'arachides, telles qu'elles sortent de la décortiqueuse sont pratiquement imputrescibles. En zone sèche sur sol très sableux, on a montré que leur enfouissement pouvait être malgré tout très bénéfique. L'enfouissement de 20 t/ha a fait passer le rendement de 1 310 à 2 110 Kg/ha. D'autres expériences ont montré que le broyage des coques augmentait significativement leur action.

Toutefois on a montré que le rôle des coques était physique et qu'elles agissaient en freinant les mouvements de l'eau dans les couches du sol explorées par les racines (mouvements par asensum notamment). En année normale ou pluvieuse ces mêmes coques n'ont aucun effet.

Par contre dès que le produit subit un début de décomposition les effets dus à l'apport d'éléments minéraux se manifeste nettement.

Le paillage.

La technique de couverture morte constitue quand elle est suffisamment épaisse un apport organique intéressant. Un paillage de 30 cm de hauteur en paille sèche sous-entend un tonnage de 70 à 90 t/ha cette hauteur étant observée avant tassement. Or avec ces 30 cm la décomposition paraît difficile et les racines peuvent se dessécher l'écran n'étant pas suffisant. Avec 60 cm de hauteur (200 t/ha de paille) on fabrique un véritable fumier en place ou les racines puisent directement (on constate communément un lacis de racines à la surface du terrain).

L'enfouissement des pailles en culture mécanisée peut également être très utile dans la reconstitution du stock de matière organique mais cette pratique demande quelques précautions.

En effet dès que les pailles sont enfouies, elles deviennent la proie d'une multitude de microbes qui, pour se multiplier, empruntent au sol l'azote nécessaire. D'où l'effet dépressif souvent constaté d'un enfouissement de pailles sur les cultures suivantes. Il n'est d'ailleurs que temporaire : l'expérience montre que les rendements retrouvent rapidement leur niveau antérieur, lorsque l'azote immobilisé est restitué aux cultures par la minéralisation des déchets microbiens.

Comment expliquer cet effet dépressif ? 1 t de paille qui contient en moyenne 5 kg d'azote donnera 250 kg d'humus renfermant 12,5 kg d'azote (au taux moyen de 5 %). Or cette tonne de paille ne contenant que 5 kg d'azote a dû prélever dans le sol $12,5 - 5 = 7,5$ kg d'azote par l'intermédiaire des microbes humificateurs. Cet azote "emprunté" au sol lui sera rendu ultérieurement, mais en attendant, il y a immobilisation provisoire de l'azote nitrique du sol, d'où effet dépressif sur la culture en terre jusqu'à ce que l'azote organique microbien et celui de l'humus aient été restitués au sol par minéralisation.

Il est possible d'éviter l'effet dépressif en apportant sur les pailles, avant de les enfouir, des engrais azotés minéraux qui compenseront tout ou partie de prélèvements d'azote effectués par les microbes dans le sol, soit 6 à 8 kg d'azote pur par tonne de paille (de l'urée, du sulfate d'ammoniac ou des ammonitrates).

Cet apport d'azote est valable pour tous les résidus lignifiés riches en cellulose et hémicellulose, alors qu'il ne s'impose pas pour les résidus formés de tissus jeunes relativement riches en azote.

3) Le fumier artificiel ou compost

Le principe est d'utiliser les pailles de brousse et de les transformer préalablement en fumier avant de les enfouir.

Le grand avantage de la méthode est de rendre les pertes minimales au cours de la décomposition qui est pratiquée avec les méthodes les plus classiques (arrosage des tas au départ, maintenir d'une bonne humidification et apport d'azote pour favoriser la fermentation). Parfois des planteurs cons-

truisent des plates-formes ou des fosses étanches mais une excellente méthode consiste à établir les tas de fumier sur le sol lui-même de la plantation, on changeait les emplacements après chaque fabrication. On réduit alors les déplacements au minimum. On obtient des résultats différents selon le matériel végétal utilisé : les pailles non mûres se décomposent très rapidement, de même les déchets de désherbage ; par contre les graminées coupées en saison sèche, sont durcies, souvent siliceuses et se décomposent mal.

Analyse de compost (par rapport à la matière sèche)

Nature du fumier	Humidité	Azote total	Humus total	Humus précipité	H. précipité total	Per- te au feu	P ₂ O ₅ total	K ₂ O
	%	%	à froid	table	%	%	%	%
Paille brousse + 5 kg SO ₄ Am à la tonne	83	0,6	1,5	1,1	73	70,7	0,02	-
Herbe sèche + déchets plantation	83	1,4	2,0	1,4	70	64,1	0,26	10,08
Herbes plantation + troncs..	75	1,6	5,4	2,3	42	60,6	0,83	2,4
Troncs et feuilles	72	0,9	2,2	1,0	45	38,3	0,11	10,05
Terreau d'un an	65	0,9	2,2	1,2	55	32,5	0,34	0,04
Terreau d'un an	51	0,5	1,6	0,8	50	12,9	0,07	10,01

On obtient 2 à 2,5 fois plus de fumier en poids qu'on a apporté de paille au départ selon la maturité des pailles, l'avancement de la décomposition etc... Il faut donc beaucoup moins de paille pour un compost que pour faire du paillage.

De plus l'emploi de fumier artificiel est très rentable par rapport au paillage. En culture bananière ce fumier, par rapport au sol nu, donne des accroissements de rendements appréciables (10 à 15 t t). Pour cette culture il est actuellement conseillé d'utiliser en épandage annuel des quantités de 100 à 200 t de fumier artificiel bien décomposé à l'hectare.

4) Le Fumier de ferme.

Le fumier est encore assez rare en pays tropicaux mais le développement de la culture attelée devrait permettre l'extension de sa fabrication et de son utilisation. Dans quelques pays on utilise depuis longtemps le fumier de ferme. Aux Canaries la majorité des exploitations possède un troupeau en stabilisation dont la fonction principale est de fournir les quantités de fumier nécessaires chaque année ; il faut pour cela deux têtes de bœufs par ha de bananerie la dose habituelle étant de 30 kg par plante. CHARPENTIER en Côte d'Ivoire préconise également l'entretien d'un troupeau sur l'exploitation pourtant où cela est possible : un apport de 120 t/ha de fumier donne un gain de 10 tonnes de régime.

Composition

Le fumier est constitué par un mélange de litière et de déjections ayant subi des fermentations plus ou moins avancées.

Selon les provenances on observe de grandes variations dans la composition des fumiers. En Haute-Volta le fumier de porcs est très riche en potasse et assez riche en azote, il est retiré d'un petit enclos dans lequel le bétail est parqué chaque nuit. Au Sénégal, si le fumier de porc est riche en azote il est relativement pauvre en potassium, il provient de champs où les animaux ont séjourné quelque temps seulement et est constitué presque essentiellement de déjections desséchées.

Les fumiers de ferme varient aussi selon les techniques de préparation (couverture ou pas, arrosage ou pas ...). Il en sera de même des composts.

Parmi les facteurs de la variation du contenu minéral des fumiers, un des plus importants est la matière première. Les végétaux qui servent de nourriture au bétail présentent des caractéristiques diverses, selon les zones où ils sont récoltés. Au Sénégal et en Haute-Volta où la déficience en phosphore est quasi générale les produits ont tous une teneur en phosphore relativement basse par rapport aux autres éléments (K_2O en particulier).

Composition (%) de diverses formes de matières organiques

	N	P ₂ O ₅		K ₂ O	Chaux	Magnésie	Matières organiques
		Total	Soluble				
Fumier de parc Haute-Volta(1)	1,95	0,81	0,65	3,16	1,84	1,06	55,0
Fumier de ferme Haute-Volta	1,40	0,60	0,39	2,15	1,05	0,68	41,0
Compost Haute-Volta	0,75	0,23	0,17	0,76	0,65	0,41	56,5
Fumier de parc Sénégal	1,85	0,96	0,71	0,33	2,50	0,87	71,5
Fumier de ferme Sénégal	0,95	0,66	0,31	1,62	1,40	0,51	71,5
Coques d'arachides compostées Sénégal	1,20	1,30	0,35	0,30	-	0,20	59,7

Si l'on admet que la dose habituelle de fumure organique susceptible d'être apportée par le cultivateur africain moyen varie de 5 à 10 t/ha, les quantités d'éléments réellement appliquées au sol sont respectivement de :

Quantités d'éléments apportés par la fumure organique

Quantité d'élément	Pour 5 t/ha
N	97,5 à 37,5 Kg/ha
P ₂ O ₅ total	65 à 11,5 Kg/ha
P ₂ O ₅ soluble	35,5 à 8,5 kg/ha
K ₂ O	158 à 15 kg/ha
CaO	125 à 32,5 kg/ha
MgO	53 à 10 kg/ha

Action du fumier.

Des essais faits par l'I.R.H.O. en particulier au Sénégal et en Haute-Volta sont significatifs. A Darou dans les conditions les plus favorables (10 t de fumier tous les deux ans) l'augmentation globale sur cinq ans des rendements de l'arachide représente 67 % ; dans des conditions similaires celle obtenue sur la

(1) Analyses exécutées par le laboratoire d'étude et de contrôle des engrais, Société des Agricultures de France, 8, Rue d'Athènes, PARIS- IXe.

céréale (sorgho) atteint 137 %.

L'apport d'engrais organique directement sur céréales aux doses les plus élevées (10 t/ha tous les 2 ans ou 20 t/ha tous les 4 ans), permet de multiplier les rendements par 2,5 ou par 3 et d'atteindre des productions dépassant alors 1 t/ha.

On peut expliquer cette différence de réponse de la fumure organique entre le sorgho et l'arachide par la composition de base des fumiers ; ceux-ci surtout riches en azote et potasse répondent mieux aux exigences des céréales en ces deux éléments, alors que l'intensité de la réponse de l'arachide est beaucoup plus fonction de la quantité de phosphore apportée.

Le purin.

C'est un liquide très fermentescible provenant des urines des animaux. Sa composition très variable montre un déséquilibre constant en phosphore.

On admet en moyenne par m³ :

Azote	1,5 kg
Acide phosphorique	0,25 kg
Potasse	4 Kg

Sa principale utilisation est le purinage des prairies, il faut alors éviter le sur-purinage qui conduit à la dégradation de la flore.

Utilisé sur les cultures il doit être enfoui pour limiter les pertes d'azote en particulier.

5) Les engrais verts

L'action fertilisante des engrais verts est due en grande partie à la fixation d'azote atmosphérique (50 à 60 Kg/ha) par les légumineuses soit à l'immobilisation puis à libération des éléments minéraux comme le phosphore et le potassium.

L'intérêt des engrais verts est très discuté et il y a lieu d'être très prudent avant de recommander leur usage dans les pays tropicaux.

(Cette question est traitée dans le cours d'Agronomie).

B. LES ENGRAIS MINÉRAUX

Si la fumure organique est très généralement une nécessité absolue pour la reconstitution de la fertilité des sols tropicaux après mise en culture, l'application d'engrais minéraux selon des formules judicieusement choisies constitue un des moyens de choix pour obtenir des accroissements substantiels de rendement, en particulier dans le milieu forestier où l'élevage est pratiquement inexistant.

De plus la fumure minérale, en accroissant les rendements, augmente également la masse des déchets de récolte et permet ainsi de maintenir le taux d'humus du sol.

1) La fumure azotée

Principe

Lorsque les autres facteurs limitants ont été corrigés l'azote est généralement très efficace sur les rendements avec une proportionalité directe jusqu'à des doses élevées. Par exemple en culture cotonnière, sur sols alluviaux récents du Nord-Ouest de Madagascar en l'absence de tout autre facteur limitant, des apports d'azote (urée) ont donné une réponse presque linéaire jusqu'à 4 000 Kg/ha

! Témoin	! 1742 kg/ha	!
! 92 Kg N/ha	! 3273 kg/ha	!
! 138 Kg N/ha	! 3478 Kg/ha	!
! 184 Kg N/ha	! 3833 Kg/ha	!

Toutefois la pratique de cette fumure reste délicate car elle est entièrement sous la dépendance de la dynamique de l'azote dans les sols qui

actuellement est assez mal connue en pays tropicaux. (voir cours de Pédologie). La majeure partie de cet élément, en l'absence de fumure, est sous forme organique inutilisable directement et seule une faible proportion est minéralisable par des processus microbiologiques pendant la saison culturale. Cette fourniture d'azote à la plante est donc indépendante des besoins de cette dernière. Or l'azote peut avoir une action dépressive sur les rendements au-delà d'une certaine dose, les apports doivent donc tenir compte des réserves du sol mises à la disposition de la plante sous peine de dépasser les doses limites.

D'autre part l'azote minéral, en particulier sous forme nitrique, est très mobile dans le sol, ce qui interdit toutes possibilités de constituer des réserves pour une longue période. Par contre cette mobilité entraîne une rapidité d'action qui permet une intervention au moment des périodes de pointe dans l'absorption de cet élément par la plante.

Les principaux engrais et leur utilisation

Les engrais azotés se classent dans trois catégories suivant la forme de l'azote : nitrate, ammoniacque et urée.

a) Les engrais nitriques.

Ils sont très solubles :

- non retenus par le complexe absorbant
- rapidement assimilés par la plante.

N'exigeant pas de transformation microbienne préalable leur action est très rapide en présence d'un minimum d'humidité. Ce sont donc par excellence les engrais pour interventions rapides en cours de végétation. Sous climat tropical les risques de lixiviation de ces engrais sont importants aussi les nitrates sont peu utilisés sauf dans des cas bien précis (par exemple les nitrates de chaux ou de potasse sont parfois répandus pour réduire des phénomènes de chlorose). Enfin ces engrais sont onéreux.

- Le nitrate de soude du chili est le plus ancien de ces produits.

Actuellement l'industrie en fabrique également de petites quantités.

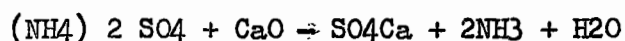
Il se présente sous forme de granulés contenant 16 % d'azote et une proportion élevée de sodium. Ce dernier caractère conduit à ne pas conseiller cet engrais dans les terres ayant tendance à devenir battantes ou présentant des caractères d'halomorphie. Enfin certaines plantes tropicales (café, cacao) sont sensibles au sodium et tolèrent mal cet engrais.

- Le nitrate de chaux contient 15 % d'azote et environ un quart de leur poids en chaux. C'est un produit très hygroscopique qui fond facilement. Cette propriété est très gênante pour sa conservation. C'est l'engrais le plus rapidement absorbé par les plantes en période de sécheresse.
- Le nitrate de chaux et de magnésio est obtenu en attaquant la dolomie ($\text{CO}_3\text{Ca} \text{ CO}_3\text{Mg}$) par de l'acide nitrique, il contient 13 à 15 % d'azote et environ 8 % de magnésio. Il peut être employé dans les sols où l'on craint une carence magnésienne.
- Le nitrate de potasse dose 13 % d'azote et 44 % de potasse. C'est un engrais binaire que l'on trouve souvent dans les complexes où il prend naissance en cours de fabrication.

b) Les engrais ammoniacaux.

L'action de ces engrais est moins brutale et plus progressive. Retenus par le complexe absorbant ils constituent une garantie plus grande contre le lessivage sous les climats pluvieux.

- Le sulfate d'ammoniac se présente sous la forme de petits cristaux et contient 20 à 21 % d'azote. C'est l'engrais ammoniacal le plus anciennement utilisé. Ce produit présente la particularité importante de contenir 23 % de soufre. Enfin il est facile à épandre et se mélange bien avec le super et le chlorure de ptassium. Par contre il ne faut pas le mélanger avec des produits alcalins (scories, chaux), pour éviter des dégagements d'ammoniac.



Son hygroscopicité est faible donc sa conservation ne pose aucun problème en climat humide.

C'est actuellement l'engrais azoté le plus répandu vu sa commodité d'emploi, son prix faible et ses effets souvent spectaculaires en particulier sur les sols tropicaux qui pour la plupart sont paubres en matière organique et dont le facteur limitant est très souvent l'azote.

Comme tous les engrais ammoniacaux le sulfate d'ammoniaque a une action acidifiante, puisque l'ion ammonium est transformé en ion nitrique avec libération d'ions H et que l'acidification du radical peut se produire lors de la dissociation de ce sel dans le sol. Son emploi doit être compensé sur sols acides par un amendement constant. Il faut environ 100 parties de CO_3Ca pour neutraliser 100 parties du produit commercial, on peut également associer à cet engrais une fumure phosphopotassique ou du fumier qui jouent un rôle antagoniste et maintiennent le pH du sol.

L'IFAC, en Guinée, sur ananas a montré la supériorité du sulfate d'ammoniaque sur l'urée ; il est possible qu'elle soit due à la présence de soufre dans le premier engrais. En effet au Sénégal sur arachide des expériences dissociant l'action de l'azote et celle du soufre ont montré que l'action avantageuse du sulfate d'ammoniaque était due principalement au soufre qu'il contient.

PK + urée	2.130 Kg/ha
PK + urée + sulfate de soude	3.060 Kg/ha
PK + sulfate d'ammoniaque	3.030 Kg/ha

En règle générale l'urée doit être préférée au sulfate d'ammoniaque lorsqu'il n'y a pas un besoin certain en soufre.

Le chlorhydrate d'ammoniaque.

Il contient 22,5 à 23 % d'azote ammoniacal et s'emploie comme le sulfate ; à ceci près que, ne renfermant pas de soufre mais du chlore, son emploi n'est pas indiqué sur les cultures qui craignent le chlore.

Le chlorhydrate est souvent utilisé comme matière première pour la production des engrais de mélange ; d'autre part, dans la fabrication des engrais complexes, il peut y avoir formation de quantités plus ou moins importantes de ce produit, suivant le procédé mis en oeuvre.

Le phosphate d'ammoniaque

Engrais mixte dosant, suivant les fabrications, 17,5 à 20 % d'azote ammoniacal et 40 à 52 % d'acide phosphorique soluble dans l'eau.

C'est un engrais de choix, du fait de sa haute concentration et de la très grande solubilité de son acide phosphorique. Son prix le fait réserver aux cultures riches, ou pour des usages spéciaux ne comportant que l'emploi d'une petite quantité d'engrais (localisation).

Il semble que l'interaction azote-acide phosphorique soit favorisée par la combinaison réalisée dans ce produit, avec lequel on obtient des résultats remarquables.

Dans la fabrication des engrais complexes, il se forme des quantités notables de phosphate d'ammoniaque, variables suivant les procédés utilisés.

c) Les engrais ammoniaco-nitrique

Ils combinent sur un même produit les propriétés des engrais nitriques et ammoniacaux. Les engrais à base de nitrate d'ammoniaque ont pris de très loin la première place sur le marché des engrais azotés.

Les conditions d'emploi des engrais ammoniaco-nitriques découlent de ce qui a été dit plus haut sur les engrais ammoniacaux et nitriques. Ces engrais auront une action plus soutenue par leur partie ammoniacale.

Le nitrate d'ammoniaque

A l'état pur, il dose 35 % d'azote, mi-nitrique, mi-ammoniacal. Son emploi direct en culture est impossible en raison de sa grande hygroscopicité. Il est livré aux fabricants d'engrais de mélange sous forme de produits dosant de 33,5 à 34,9 % d'azote suivant séchage, qui permettent d'obtenir des formules riches en azote.

Les ammonitrates

On appelle ainsi des produits dans lesquels le nitrate d'ammoniaque est fixé sur un support plus ou moins important. Pour les ammonitrates à faible et moyen dosages, le support est le plus souvent du carbonate de chaux. Un ammonitrate de 20,5 % contient environ 35 Kg de calcaire aux 100 kg. Pour les ammonitrates à haut dosage, type 33,5 %, les granulés sont enrobés dans une mince pellicule de Kieselguhr ou de calcaire. S'agissant du mélange d'un produit pur et d'un support, suivant la proportion de l'un et de l'autre, on aura des dosages variés.

On distingue trois grandes catégories d'ammonitrates qui renferment tous leur azote sous la forme mi-nitrique, mi-ammoniacale.

- Ammonitrates à faible dosage : 20,5 % d'azote.

Leur faible concentration facilite l'épandage des petites doses.

- Ammonitrates à dosage moyen : 27,5 % d'azote.

- Ammonitrates à haut dosage, de 33,5 à 34,5 % d'azote, dont le support est réduit à presque rien. Ils sont particulièrement appréciés dans les régions où l'on utilise de fortes fumures.

d) L'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ est un composé du groupe des amides. Commercialisée sous forme pluvérolente ou granulée (Perlurée), elle dose de 45 à 46 % d'azote. La densité de la "Perlurée" est faible (50 kg occupent un volume de 73 litres) ce qui facilite l'épandage et surtout réduit énormément les frais de transport.

Sous l'action d'une diastase particulière, l'uréase, secrétée par certaines bactéries l'urée s'hydrolyse dans le sol et passe à l'état d'azote ammoniacal qui nitrifie à son tour.

L'urée n'est pas fixée par le sol tant qu'elle n'est pas hydrolysée en NH_4 et CO_2 . Elle peut donc migrer librement. Néanmoins ses possibilités pratiques de déplacement sous l'influence de l'eau infiltrée restent dans les limites

de l'épaisseur normale du sol, pendant le court laps de temps où elle ne serait pas hydrolysée. L'hydrolyse de l'urée au contact du sol est toujours un phénomène rapide terminé en quelques jours. Le plus souvent deux ou trois jours suffisent. Plus rarement 7 ou 8 jours peuvent être nécessaires pour que l'hydrolyse soit complète dans certains sols. En sol inondé, fortement recouvert d'eau l'hydrolyse se trouve ralentie, le contact de l'urée et du sol étant moins étroit. Cette hydrolyse, avec libération d'ammoniac, s'accompagne d'une variation du pH vers l'alcalinité dont l'importance atteint 0,5 à 0,7 unité pH pour les sols normalement constitués auxquels on applique des doses d'azote moyennes à fortes dans la pratique courante de la fertilisation.

L'urée comme les autres engrais azotés nitrifie plus ou moins rapidement selon les sols. Dans les sols acides, elle nitrifie plus rapidement que le sulfate d'ammoniaque. Cette propriété doit être rapprochée de l'élévation du pH qui accompagne son hydrolyse.

La cyanamide de chaux dose 18 à 22 % d'azote. Elle est livrée en poudre, en granules ou en perles. Dans le sol la cyanamide subit une première transformation qui fait passer l'azote de la forme amidique à la forme ammoniacale qui sera soumise ensuite à la nitrification.

Le prix de cet engrais est assez élevé aussi n'est-il que très peu utilisé en Afrique. Ce produit, outre l'azote, apporte de la chaux - 60 à 70 % de chaux vive) sous une forme très active qui peut le faire apprécier dans les sols décalcifiés.

L'urée formol.

Ces produits sont des engrais organo-minéral de synthèse appelés Azorgan pour ceux fabriqués par l'Office National Industriel de l'Azote. Ils ne sont pas commercialisés certains problèmes techniques et économiques n'étant pas encore résolus.

Ces produits sont insolubles dans l'eau ou bien ne sont solubles qu'à un taux très faible ou pour une faible partie de leur masse. Ils peuvent donc résister au lessivage comme aux remontées et aux déplacements latéraux avec l'eau de pluie ou d'irrigation.

Mais au contact du sol ils subissent une hydrolyse qui libère progressivement de l'ammoniac. Le rythme de cette libération peut régler d'après la composition ou le procédé de fabrication du produit ; il est également soumis à la nature du sol et aux conditions écologiques.

Dire que ces produits fourniront de l'azote à la mesure exacte des aspirations de la plante serait aller trop loin pour le moment. Ils sont plutôt en mesure de libérer de l'azote d'une manière continue selon une courbe précédemment déterminée, à la manière dont agissent déjà certains composés organiques.

L'intérêt de cet engrais sera certainement très grand sous climat tropical pour la fertilisation des plantations fruitières, caféiers, théiers, cacaoyers. Les résultats déjà obtenus par l'IFAC sont très significatifs à cet égard. On rencontre ici toutes les circonstances favorables : avantage technique de la solubilisation progressive, absence d'hygroscopicité qui permet la bonne conservation, grande concentration qui économise les frais de transport.

Il est possible, malgré un rapport des prix moins favorables que des cultures telles que le coton ou l'arachide révèlent aussi un intérêt réel pour ce produit spécialement en terres épuisées pauvres en matière organique.

2) La fumure phosphatée

Principe

Les sols tropicaux sont caractérisés par une carence fréquente en acide phosphorique, carence qui n'est pas toujours due à l'absence de phosphore, mais à l'état de cet élément sa fixation étant intense dans ces sols renfermant des hydroxydes de fer. Du fait de cette fixation la concentration des solutions des sols en acides phosphoriques est souvent très faible.

Il n'est pas rare de trouver dans les solutions des sols tropicaux des concentrations en acide phosphorique de l'ordre de 5/100 de milligrammes par litre. L'alimentation phosphatée est perturbée par ces faibles concentrations.

L'apport d'engrais phosphaté, dans la mesure où il élèvera le taux des réserves du sol pourra modifier la concentration d'équilibre de la solution du sol et de ce fait améliorer la nutrition phosphatée des plantes. Dans bien des cas la fumure est inefficace mais il ne faut pas se presser de conclure que cette inefficacité est due à ce que le sol renferme suffisamment d'acide phosphorique. L'intensité et la rapidité des phénomènes de fixation peuvent être responsables de l'absence de réponse à la fumure phosphatée.

Plusieurs procédés permettent d'accroître l'efficacité des engrais phosphatés :

- L'emploi de la matière organique
- L'influence de l'ion silicique
- Le chaulage.

a) Emploi de la Matière Organique

La présence dans les sols latéritiques d'hydroxydes de fer provoque, à la suite d'apport de P_2O_5 l'évolution très rapide de celui-ci vers des formes ferriques particulièrement insolubles. De ce fait, la fumure phosphatée est un problème particulièrement difficile à résoudre, P_2O_5 passant très rapidement dans ces sols sous des formes inassimilables pour les végétaux.

CHAMINADE, SEGALEN et VISTELLE ont fait des recherches sur l'influence de l'humus dans ces sols (sol latéritique de Madagascar).

Ces expériences ont établi que pour un sol latéritique dans lequel l'évolution de P_2O_5 vers des formes insolubles est particulièrement intense, l'humus permet dans une large mesure le maintien de P_2O_5 sous des formes assimilables par les végétaux.

Les causes des heureux effets de l'emploi de la matière organique sur l'assimilation du phosphore par les plantes a fait l'objet de nombreux travaux.

D'après les travaux de RUSSELL, KAUDOS, STRUTHERS et SIELING, on se trouve, dans la décomposition de la matière organique en face d'anions organiques

d'un type défini, les "anions actifs" de DEMOLON, nés de l'action de microorganismes qui agissent sur le sol non seulement en évitant la précipitation des phosphates de Fe, mais encore en libérant le phosphore fixé sous forme de phosphate de Fe, dont la valeur comme engrais est pratiquement nulle.

Ce comportement n'est qu'un effet du processus de "chelation" où ces anions organiques agissent comme "agents chelating" (Chelats).

Par le processus de chelation on donne naissance à des composés très stables par combinaison entre anions organiques et certains cations tels que ceux de Fe, Al, Ca, Zn, Mn et Cu.

Le processus de chelation peut influencer sur la nutrition végétale de différentes manières :

- Supprimer l'activité de Fe du sol comme agents fixateurs du phosphore et faciliter ainsi l'assimilation de ce corps par les plantes.
- Déterminer la solubilisation des phosphates de Fe.

Le rôle du processus de chelation dans le blocage des hydroxydes de Fe nous amène facilement à admettre les avantages qu'on obtiendrait en additionnant à des engrais, comme les superphosphates, des "agents chelating", surtout quand ces engrais sont destinés à fertiliser des terrains où une forte fixation est à craindre.

Dans les terrains acides, riches en hydroxydes, le mélange des engrais phosphatés au fumier ou aux engrais verts produisent un effet fertilisant supérieur de la part de l'engrais, effet auquel ne doit pas être étrangère en dehors d'autres causes, la présence des "agents chelating" provenant de la décomposition de la matière organique.

En effet, il a été montré que l'adjonction d'un agent chelating tel que l'acide oxalique au superphosphate a contribué à un accroissement de l'absorption du phosphore par le blé. L'expérience a eu lieu en terrain acide, à fort pouvoir fixateur du phosphore. Le mélange de l'engrais et de l'acide oxalique a été soigneusement incorporé au sol. L'absorption du phosphore fut ainsi accrue de

13 et de 32 % quand à la dose de 330 kg/ha de superphosphate on additionne respectivement 275 et 550 kg/ha d'acide oxalique.

b) Influence de l'ion silicique

La silice est, comme nous le savons un des éléments actifs qui, participant aux phénomènes de fixation et d'échange des anions dans le sol, permet d'envisager l'emploi de composés siliciques pour maintenir l'assimilabilité de P_2O_5 dans les terres latéritiques.

Certains auteurs on essayé de déterminer les conditions dans lesquelles l'anion silicique pourrait retarder ou supprimer la fixation de l'anion phosphorique par les hydroxydes. BASTISSE a opéré avec des maïs, en prenant comme milieu absorbant ou des hydroxydes de fer ou d'Al fraîchement précipités, ou un sol latéritique. Les solutions nutritives renfermeraient des doses variables de scories phosphatées et de silicate.

Il ressort des expériences que l'addition de SiO_2 permet le maintien en solution de P_2O_5 même dans des conditions où celui-ci doit rétrograder énergiquement. La plante réagit dans ces conditions favorables en fournissant une récolte plus abondante et en exportant ainsi plus de P_2O_5 .

On peut aisément concevoir la précipitation de produits silico-phosphatés permettant à P_2O_5 de rester à la disposition de la plante dans des conditions de milieu naturel.

c) Le Chaulage :

Nous avons déjà vu que les effets du chaulage sont complexes et variables suivant les conditions de sol. Dans certains cas il est admis que le chaulage peut faciliter l'absorption du phosphore par les plantes en diminuant sa fixation par les hydroxydes.

Les principaux engrais et leur utilisation

Le phosphore peut être apporté au sol sous des formes variées plus ou moins solubles dans l'eau ou le citrate d'ammoniaque. C'est ainsi que dans la

pratique on distingue :

Les engrais phosphatés solubles (superphosphate, phosphate d'ammoniaque).

Les engrais phosphatés hyposolubles (bicalcique, scories Thomas, phosphal).

Les engrais phosphatés insolubles (phosphates de chaux naturels).

Le choix entre ces différentes formes d'engrais phosphatés est souvent délicat et fait intervenir des critères agronomiques, technologiques et économiques

a) Les phosphates naturels moulus.

Ces phosphates sont particulièrement intéressants à proximité de leur centre d'exploitation au Sénégal et au Togo. Ils dosent de 58 à 75 % de phosphate de chaux, les autres constituants étant principalement du carbonate de chaux et du fluorure de calcium. Après extraction, les phosphates naturels suffisamment tendres sont lavés et broyés très finement ; leur rapidité d'action et leur efficacité augmentent avec leur tendreté et leur finesse. Pratiquement, l'agriculteur doit exiger que 90 % au moins du phosphate moulu passe à travers les mailles du tamis N° 100. Mais les progrès réalisés dans les méthodes de broyage permettent aujourd'hui de mettre à la disposition de l'agriculteur des produits beaucoup plus fins : 90 % au tamis 150, et même au tamis 300 (phosphates dénommés : hyperphosphates, agrophos, etc...).

Ces phosphates dosent, selon leur origine, jusqu'à 35 % d'acide phosphorique insoluble, la plus grande partie sous forme de phosphate tricalcique, qui passe lentement dans les solutions du sol chargées de gaz carbonique et sous l'action des acides humiques.

Ce sont des engrais de fond, à action lente, à réserver aux terres acides (pH inférieur à 6,3), qui les solubilisent progressivement. On les utilise aussi, sous forme de phosphates très finement moulus, sur diverses cultures, notamment sous les climats humides (pays tropicaux), où leur efficacité est plus grande que sous les climats secs, mais il doivent toujours être enfouis par le labour quelques semaines avant le semis ou la plantation.

Au Sénégal le phosphate tricalcique à faibles doses (15 à 60 unités de P_2O_5 /ha) a un effet faible sur la nutrition et les rendements d'arachide, alors que dans les mêmes conditions l'effet du bicalcique est important et régulier.

b) Les scories de déphosphoration

Elles constituent un dérivé de la fabrication de l'acier à partir de fontes phosphoreuses, selon un procédé mis au point par l'ingénieur THOMAS pour éliminer le phosphore qui donnerait un acier cassant.

Les scories THOMAS se présentent sous la forme d'une poudre noirâtre très lourde (100 kg n'occupent qu'un volume de 50 l), qui dose de 14 à 22 % d'acide phosphorique, les dosages les plus courants oscillent entre 16 et 19 %. L'acide phosphorique se trouve dans les scories sous une forme spéciale (combinaisons complexes de phosphates et de silico-phosphates) insoluble dans l'eau, mais soluble en grande partie dans les acides faibles, en particulier dans le réactif de WAGNER qui légalement doit dissoudre au moins 75 % de l'acide phosphorique des scories.

100 kg de scories contiennent en outre 50 kg de chaux totale, dont 40 kg en chaux active. Cette haute teneur en chaux active fait des scories un engrais phosphaté de choix pour la fumure des terres acides.

Il faut noter aussi les quantités importantes de certains oligo-éléments fournies par les scories : 25 à 50 kg de manganèse et de magnésium par tonne, 20 à 70 g de bore, 10 à 60 g. de cuivre, 2 à 5 g de cobalt, 5 à 10 g de molybdène.

Les scories sont toujours un engrais phosphaté de choix. Sur arachide l'IRHO a constitué pour cet engrais une action P équivalente à celle du super et du phosphate bicalcique. Ces scories sont très solubles dans ces sols acides des régions équatoriales, elles agissent vite et ont l'avantage de contenir de la chaux libre et des oligo-éléments. Un inconvénient est leur teneur faible en P_2O_5 (20 %) et leur prix élevé en pays tropicaux.

c) Le phospal

Cette appellation commerciale désigne un engrais phosphaté fabriqué à partir de minerais phosphatés alumino-calciques extrait au Sénégal (région de Thiès). Ce sont des phosphates doubles de chaux et d'alumine calcinés puis broyés.

Il dose 34 % d'acide phosphorique dont 26 soluble dans le citrate d'ammoniaque et 8 insoluble. Du fait que les $\frac{3}{4}$ de l'acide phosphorique qu'il contient sont solubles dans le citrate d'ammoniaque, son action est comparable à celle des scories et moins rapide que celle des superphosphates.

La fumure annuelle est déconseillée par suite de la trop faible solubilisation au cours des premières années. Ce phénomène peut être compensé par des apports bicalciques en doses décroissantes à mesure que l'effet résiduel du phospal s'accroît.

Cet engrais est très apprécié des fabricants d'engrais composés de mélange, car c'est un produit neutre, concentré, non hygroscopique, qui assure aux mélanges une bonne tenue. Il se mélange pratiquement avec tous les engrais potassiques et azotés.

d) Le phosphate bicalcique

Il est fabriqué par attaque des phosphates naturels à l'acide chlorhydrique et neutralisation de la liqueur phosphorique obtenue par de la chaux. Il dose de 35 à 42 % d'acide phosphorique soluble dans le citrate d'ammoniaque, en moyenne 40 %.

Excellent engrais, le phosphate bicalcique, connu aussi sous le nom de phosphate précipité, est peu utilisé tel quel par l'agriculture. Il est surtout destiné à la fabrication d'engrais composés en raison de sa haute teneur en acide phosphorique. Il est également présent dans les engrais complexes obtenus par attaque des phosphates tricalciques par divers acides.

Sa solubilité dans le citrate d'ammoniaque le place entre les scories et les superphosphates au point de vue rapidité d'action et mode d'utilisation.

Le phosphate bioalcoique est dans beaucoup de situation tropicales et équatoriales un engrais phosphaté de grande valeur par sa haute concentration en P sa solubilité très satisfaisante en sol à pH acide et par sa teneur en chaux, élément indispensable à certaines cultures comme l'arachide par exemple.

e) Les superphosphates de chaux

Ils sont obtenus par attaque des phosphates tricalciques à l'acide sulfurique. La quantité d'acide sulfurique utilisée est exactement dosée pour que la quasi-totalité du phosphate tricalcique soit transformée en phosphate monocalcique. Le superphosphate est donc essentiellement un mélange de phosphate monocalcique et de sulfate de chaux, ce dernier pour 50 % de son poids.

Selon la richesse du phosphate à partir duquel il a été fabriqué, il dose de 14 à 20 % d'acide phosphorique soluble dans l'eau et le citrate d'ammoniaque, ce qui explique sa rapidité d'action. Aussi le superphosphate peut-il être utilisé sur toutes les cultures, non seulement en fumure de fond, comme les autres engrais phosphatés, mais également en couverture pour assurer l'alimentation phosphatée de la plante à un moment critique.

Le superphosphate convient particulièrement à toutes les terres normalement pourvues en chaux. On l'a accusé à tort d'être responsable de l'acidification des sols cultivés ; des expériences de longue durée ont montré que, même à fortes doses, le superphosphate n'avait pas d'influence sur le pH du sol. En sol acide, l'efficacité du superphosphate est améliorée par un chaulage.

Le superphosphate, malgré la place prise par d'autres produits sur le marché, reste l'engrais phosphaté par excellence des terres neutres et calcaires, et le plus rapidement utilisable par la plante. De tous les engrais phosphatés, c'est celui qui a les plus larges possibilités d'emploi, à la fois dans l'espace et dans le temps.

Il apporte au sol du calcium sous forme de phosphate monocalcique et de sulfate de chaux, soit l'équivalent de 28 % de son poids en chaux CaO. Il faut insister sur sa richesse en soufre (11 à 12 % de son poids), aliment de la plante. Il contient aussi de petites quantités d'oligo-éléments tels que : fer, inc, manganèse, bore molybdène.

C'est surtout à propos du superphosphate qu'on a parlé de rétrogradation, action tendant à diminuer l'activité des ions PO_4 par l'enrichissement en calcium du phosphate monocalcique qui passerait à l'état bicalcique, puis tricalcique. Le fait est indiscutable en sols calcaires, mais on sait aussi que les ions PO_4 ainsi "rétrogradés" ne sont pas perdus pour la plante et qu'ils se retrouvent sous une forme qui leur permet de repasser en grande partie dans les solutions du sol.

Il existe également des superphosphates concentrés appelés super-double ou triple qui dosent de 40 à 50 % d'acide phosphorique. En raison de leur concentration, ils sont surtout utilisés pour la préparation de mélanges très concentrés et dans des régions où les transports sont difficiles.

Les superphosphates sont le plus souvent pulvérulents, mais on commence à trouver des supers granulés et nous pensons que la tendance à la granulation s'accentuera.

Le super triple s'avère très souvent les meilleurs des engrais annuels. On peut lui reprocher par rapport au superphosphate son manque de soufre. Sans le sous-estimer le problème du soufre ne semble pas se poser si on utilise le sulfate d'ammoniaque comme engrais azoté. Par contre le supersimple présente l'inconvénient de frais de manutention, sacherie et transport élevés.

f) Le phosphate d'ammoniaque

C'est un engrais mixte (azote et acide phosphorique) de très haute concentration en éléments fertilisants solubles : 17,5 à 20 % d'azote ammoniacal et 40 à 52 % d'acide phosphorique soluble à l'eau et au citrate d'ammoniaque (voir engrais azotés).

g) Les engrais phosphatés d'origine animale

Phosphate d'os : par broyage des os dégraissés, on obtient une poudre fine qui dose 24 à 25 % de P_2O_5 insoluble et 3 à 4 % d'azote organique. Si ces os sont au préalable déglatinés, le produit est un peu plus riche en P_2O_5 (27 à 30 %), mais ne contient presque plus d'azote (0,8 à 1 %).

Superphosphates d'os : obtenus par action de l'acide sulfurique sur des os broyés dégelatinés (16 à 18 % P_2O_5 soluble) ou non dégelatinés (os verts - 12 à 14 % P_2O_5).

3) La fumure potassique

Principe

Comme pour l'acide phosphorique l'objectif de la fumure est d'entretenir la richesse des solutions du sol à un niveau convenable. Mais dans le cas de la potasse les plantes semblent en absorber d'autant plus qu'on en met davantage à leur disposition sans qu'au-dessus d'une certaine quantité indispensable le rendement s'en trouve augmenté. C'est ce qu'on appelle une consommation de luxe. Il est donc difficile d'envisager des fumures de fond.

D'un autre côté il a été montré que l'alimentation potassique d'une plante peut être bien meilleure sur un sol riche sans engrais que sur un sol pauvre avec engrais. Il semble donc utile d'enrichir progressivement le sol puis de le maintenir à un niveau convenable mais sans excès.

En Afrique tropicale les besoins en potassium semblent liés actuellement à quelques types de sols (ferrallitique, sables tertiaires) et à certaines cultures dont les exportations sont très importantes (bananier, palmier à huile, cocotier). En règle générale les essais au champ ne parviennent pas à mettre en évidence des carences même en sols considérés comme pauvre (0,2 meq/100 g). Cependant on constate un certain appauvrissement du sol en potassium et on peut donc craindre qu'une production intensive entraîne un épuisement du sol.

Le problème de la rentabilité de la fumure, dans les conditions actuelles, amène souvent à négliger le potassium. Cette solution imparfaite ne pourra être maintenue dans le cadre de cultures stables et intensives.

Les principaux engrais potassiques

Les engrais potassiques utilisés en France proviennent des importants gisements naturels de sels de potasse d'Alsace. Le sel brut extrait de ces gisements est la sylvinite qui contient à la fois du chlorure de potassium et du

chlorure de sodium (sel gemme) ; c'est un mélange de petits cristaux rouges et blancs. En traitant industriellement ces sels bruts, on obtient les différents engrais potassiques.

Le dosage des engrais potassiques ne s'exprime pas en potassium (K), mais en oxyde anhydre de potassium (K_2O) ou potasse, qui renferme 83 % de potassium pur. Cette convention est analogue à celle en usage pour exprimer le dosage en acide phosphorique.

La sylvinite.

La sylvinite ordinaire, dosant 25 % de potasse sous forme de chlorure, ne se trouve pratiquement plus dans le commerce.

La sylvinite double, dosant 40 % de potasse du chlorure de potassium, est obtenue par enrichissement de la sylvinite ; elle ne contient plus que 30 % de chlorure de sodium.

Le chlorure de potassium est pratiquement la seule partie utile pour les plantes. Le chlorure de sodium de la sylvinite est le plus souvent de peu d'intérêt pour la végétation et peut même être nuisible (graines en germination). Comme la plupart des sels de sodium il présente l'inconvénient de décoaguler l'argile du sol.

La sylvinite, en glaçant les terres argileuses, accentue leur imperméabilité. Il faut donc éviter son emploi en terres argileuses compactes ou manquant de chaux et en terres battantes, car elle augmente les défauts de ces terres. Elle peut être utilisée en terres légères, sableuses ou calcaires, car elle augmente la cohésion du sol et contribue à en maintenir la fraîcheur.

Le chlorure de potassium

C'est l'engrais potassique le plus couramment utilisé. Il se présente sous forme de cristaux blancs et dose au moins 60 % de potasse. Il provient du raffinage de la sylvinite dont on élimine la presque totalité du chlorure de sodium (le chlorure de potassium pur dose 63 % de potasse).

Ne contenant pas ou très peu de chlorure de sodium, il convient à tous les sols et à toutes les cultures, sauf celles craignant le chlore (le tabac en particulier, pour les mêmes raisons que la sylvinite).

On peut admettre que c'est le sol de potasse dont l'emploi reste le plus large et le plus avantageux dans la majorité des cas. On aura généralement intérêt à l'épandre de bonne heure.

Le sulfate de potasse

Sel jaunâtre fabriqué par traitement du chlorure de potassium par l'acide sulfurique : il dose 48 % de potasse et ne contient pas de chlorure. C'est un engrais de qualité, donnant l'unité de potasse à un prix un peu plus élevé que les précédents, qui convient à tous les sols et à toutes les cultures.

On l'utilisera par priorité sur les cultures pour lesquelles la qualité a une grande importance : Ananas - Tabac.

Le nitrate de potasse.

Engrais azoté et potassique renfermant 13 % d'azote nitrique 44 % de potasse, qui apporte ses éléments sous une forme immédiatement assimilable. Il est entièrement soluble dans l'eau et peut s'utiliser en couverture comme un autre nitrate. C'est un engrais de qualité ne laissant aucun déchet nuisible dans le sol, que l'on peut utiliser sur toutes les cultures et en particulier sur certaines cultures spéciales (légumes, fleurs, arbres fruitiers). On utilise aussi en pulvérisation foliaire sur vigne et arbres fruitiers. Les engrais complexes renferment souvent du nitrate de potasse formé en cours de fabrication.

Le bicarbonate de potasse.

Fabriqué depuis peu, cet engrais dose 46 % de potasse. C'est essentiellement l'engrais pour terres acides qui a le double avantage de ne laisser aucun déchet nuisible dans le sol et d'économiser les réserves de calcium du sol.

4) Soufre et Magnésie

Le soufre et le magnésium sont qualifiés d'éléments secondaires. Leur besoin se fait généralement moins vite sentir que celui de l'azote du phosphore ou de la potasse. Ils doivent toutefois pas être négligés.

Magnésie

Les récoltes prélèvent dans les sols des quantités importantes de magnésie, en outre les pertes par drainage sous les climats tropicaux ne sont pas négligeables.

Exportations (kg/ha) en MgO par rapport aux éléments N - P - K

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO
Banancier	90	20	192	20	15
Ananas	120	40	300	54	80
Canne à sucre	120	100	240	70	80
Arachide (1000 Kg en gousse)	70	12	28	15	30

Les déficiences en cet élément sont assez fréquentes dans les sols sableux et acides de pays tropicaux.

En particulier on la rencontre sur Bananiers, palmiers, citrons, Avocatiers.

Les travaux de l'IFAC ont prouvé l'importance des apports magnésiens dans l'alimentation du banancier, leur absence causant "le bleu". Ce déséquilibre serait dû à deux causes qui doivent agir souvent à la fois : d'une part la grave insuffisance des sols en magnésie, d'autre part l'emploi de fortes doses d'engrais potassique.

Les apports de chaux magnésienne, de scories magnésiennes sont conseillées, il provoquent non seulement la disparition du bleu mais aussi de très nets accroissements de rendement.

Le soufre

Le soufre est un élément plastique nécessaire à la vie de la plante. Les carences en soufre rappellent celles en azote.

En pays tropicaux il semble que c'est sur les sols ferrugineux et ferrallitiques que la carence en soufre risque le plus souvent de se produire.

Les légumineuses (arachide, luzerne) et certaines plantes oléagineuses (cotonnier) semblent être bonnes indicatrices de la carence en soufre.

En Côte d'Ivoire des réponses positives ont été obtenues sur arachide avec du soufre brut (10 kg/ha) sur sols ferrallitiques.

Une carence en soufre a été notée après introduction de l'urée comme engrais, il a par ailleurs été montré que, dans certaines circonstances les réponses supérieures obtenues par le sulfate d'ammoniaque par rapport à l'urée, étaient dues à la présence de soufre.

5) Les oligo-éléments

Les oligo-éléments sont des éléments minéraux nécessaires en petites quantités à l'alimentation des plantes. Ils présentent en général les caractéristiques suivantes :

- En leur absence les plantes ne peuvent pas se développer.
- Chacun d'entre eux a un rôle spécifique dans la nutrition.
- Leur action est une action directe.

Les sept oligo-éléments reconnus actuellement en physiologie végétale sont :

- Le Fer
- Le Manganèse
- Le Zinc
- Le Cuivre
- Le Bore
- Le Molybdène

Il n'est pas exclu que cette liste puisse être à l'avenir augmentée d'autres éléments.

D'autre part il faut remarquer que du point de vue agronomique certains éléments sans être indispensables à la vie des plantes peuvent être utiles, notamment :

- L'Aluminium
- Le Silicium
- Le Lithium
- L'Iode
- Le Vanadium
- Le Tungstène.

Enfin deux autres éléments présentent un intérêt au point de vue nutrition animale : le Cobalt et l'Iode.

Les carences en oligo-éléments, constatées et confirmées par l'analyse foliaire, l'analyse de sol, et les symptômes visuels ne sont pas toutes dues à la trop grande pauvreté du milieu en ces éléments. Parfois ces derniers peuvent se trouver bloqués et de ce fait être inassimilables pour les plantes. Dans ce cas le remède ne consiste pas à apporter au sol l'élément en question, il faut soit utiliser les pulvérisations foliaires, soit modifier les conditions défavorables du milieu.

De plus le problème des oligo-éléments se complique par le fait des toxicités possibles au-delà d'une certaine dose qui dépend en grande partie de la culture envisagée. Il faut donc être très prudent dans la pratique en ce qui concerne les doses d'apport et s'appuyer sur l'expérimentation.

Quelques exemples en pays tropicaux

On peut fréquemment observer en Afrique des symptômes de déficiences en oligo-éléments. Ils se rencontrent parfois sur de vastes zones.

Fer et Manganèse

Des études faites par l'IRHO ont mis en évidence des carences en fer manganèse, sur cocotiers, induite par une abondance de calcium. Des apports de sulfate de fer et de manganèse sont dans ce cas favorables (5 à 10 g par pied).

La carence en fer est également connue sur bananier en Israël, en Floride et aux îles Hawaï sur des sols calcaires.

Sur ananas cette carence ferrique en sols calcaires est également à retouter ainsi qu'un déséquilibre manganèse-fer.

Le rapport Mn/Fc ne doit pas dépasser 2.

Signalons enfin les cas de toxicité manganique mis en particulier en évidence pour l'arachide dans la Vallée du Niari.

Le Zinc

La carence en zinc sur bananier se caractérise par une chlorose interveinale. Elle a également été observée sur cotonnier aux Indes.

Le zinc étant peu mobile dans le sol les pulvérisations sont à préférer aux applications au sol (sulfate de zinc à 5 %).

Le Cuivre

Cette carence est très nette dans les "tourbières du Nicky" en Côte d'Ivoire, sur culture bananière ; elle donne en particulier une teinte chlorotique uniforme de tout le végétal simulant parfaitement une chlorose azotée. Ces effets ont complètement disparus par un apport de 20 kg de cuivre métal par hectare.

Le Bore

La déficience en bore causant la maladie de la petite "feuille" est un problème économique majeur pour la culture du palmier à huile au Sud Congo (Léopoldville), elle a également été récemment observée en Colombie, et enfin en

Malaisie où elle est associée à la maladie du "white stripe".

Le bore apparaît également comme un oligo-élément très important en culture caféière. Ceci a été bien montré en particulier en Côte d'Ivoire.

Des apports de borax corrigent très facilement ces carences mais il semble que des apports répétés puissent devenir toxiques.

Le Molybdène

On sait que les légumineuses ont des besoins spéciaux en molybdène, cet élément intervenant dans le mécanisme de fixation de l'azote. Dans les sols très pauvres en molybdène les racines portent des nodosités non fonctionnelles.

Des essais effectués sur culture d'arachide au Sénégal ont montré l'effet bénéfiques de molybdate d'ammonium.

6) Les engrais composés

Définitions

Les engrais précédents sont dits engrais simples parce qu'ils n'apportent qu'un seul ou exceptionnellement deux éléments fertilisants.

Les engrais composés au contraire contiennent au moins deux éléments fertilisants apportés par des corps différents. On les désigne au moyen d'une formule de 2 ou 3 nombres représentant la quantité d'éléments contenus dans 100 Kg d'engrais. Le premier nombre indique l'azote, le deuxième l'anhydride phosphorique, le troisième la potasse.

Ex. : 12 - 12 - 20 ou 20 - 20 - 0.

Différentes catégories d'engrais composés.

Suivant le procédé de fabrication, on distingue :

a) Les engrais composés de mélange

Ils représentent environ les 2/3 de la production totale des composés. On les obtient par broyage et mélange intime d'engrais simples azotés, phosphatés et potassiques, sans qu'il y ait de véritables combinaison chimique entre les divers produits.

On peut classer les engrais de mélange en binaires et ternaires.

Engrais ternaires. Ils apportent trois éléments de base, avec des formules très variées. Pour multiplier les formules il suffit de modifier la proportion des constituants du mélange.

Surtout en ce qui concerne les pays tropicaux on note une tendance à abandonner les formules pauvres au profit de formules plus riches, pour réduire les frais de sacherie de transport et de manipulation. D'un autre côté on tend à réduire le nombre des formules pour simplifier la vulgarisation de ces engrais.

Engrais binaires. Ils apportent deux éléments seulement :

- Eléments phosphatés et potassiques, ce sont notamment les scories potassiques ; supers potassiques ; phospho-potassiques ; phosphal potassique.

On obtient aussi des binaires P - K à très haut dosage par mélange de phosphate bicalcique et de chlorure de potassium.

Les dosages de P et K sont variables suivant la proportion du mélange et la richesse des constituants.

Ex. 0 - 12 - 12, 0 - 12 - 18, 0 - 20 - 10.

- Eléments azotés et phosphatés

On peut citer : les ammonitrates phosphatés, les supers azotés.

b) Les engrais complexes

Les engrais complexes sont obtenus par voie de réaction chimique à partir de produits simples (phosphates naturels, ammoniac, acide nitrique, sels de potasse).

En général les phosphates naturels sont solubilisés par l'acide nitrique. Cette réaction donne naissance à un sous produit, le nitrate de chaux, qui a le gros inconvénient d'être très hygroscopique, aussi celui-ci est-il éliminé au cours de la fabrication. On peut également fixer l'excès de chaux sous la forme de sulfate ou de carbonate de chaux.

Les complexes, suivant le procédé de fabrication contiennent différents produits tels que le phosphate monocalcique et bicalcique, le phosphate d'ammoniac, le nitrate de potasse ...

Les formules proposées sont toujours très riches (12 - 12 - 20, 14 - 12 - 16) 40 à 45 unités fertilisantes / 100 kg. Ce haut dosage permet des économies appréciables de sacherie et de transport.

IV. TECHNIQUES DE LA FERTILISATION

A. NATURE DES APPORTS

Le choix judicieux des éléments à apporter est conditionné par les principales déficiences mises en évidence en relation avec la nature des sols, des climats et des cultures. (Revoir le chapitre "Détermination des fumures"). C'est ainsi qu'en culture annuelle l'azote et le phosphore paraissent être les éléments les plus fréquemment déficients, la potasse et le soufre apparaissent plus rarement comme premier facteur limitant. Nous avons également dit que les déficiences potassiques sont plus fréquentes sur sol ferrallitique et que les sables tertiaires présentent cette carence d'une façon très générale.

De nombreuses observations qualitatives réalisées en conditions variées ont permis de dresser le tableau suivant :

Localisation	Culture	1er élément déficient
R.C.A.	Caféier	N
Sol ferrallitique	Robusta	
Cameroun	Caféier	N
Pays Bamoun	Arabica	
Madagascar	Caféier	N
Sols alluviaux Côte Est	Canephora	
Madagascar	Tabac	N
Sols alluviaux N.W.		
Madagascar	Cotonnier	N
Sols alluviaux N.W.		
Madagascar	Cotonnier	N
Sols alluviaux S.W. (Fiherenana)		
Côte d'Ivoire	Hévéa	K
Sables tertiaires		
Côte d'Ivoire	Cocotier	K
Dahomey	Palmier	
Sables tertiaires toutes conditions	Palmier à huile adulte	K
Tchad	Cotonnier	S
Sol sableux ferrallitique (Bebedjia)		
Niger-Station de Tarna	Arachide Sorgho	P
Cameroun. Nyombe	Bananier	N
Madagascar Ivoloiné	Bananier	K

Suivant l'intensification de la culture ce sont soit l'offre du sol soit la demande de la plante qui déterminera les éléments principaux à apporter. Par exemple pour la culture du maïs A. LOUE arrive à la conclusion suivante :

L'importance relative des éléments NPK varie avec l'intensification de la fumure. La dominante phosphore caractérise les petits ou très petits rendements. Il s'agit en général d'un problème de correction de carence. Ensuite la fumure devient NP ou NPK à faible K. Dès que le rendement recherché s'élève vers 40 q/ha la fumure est NPK à dominante N, puis enfin à dominante NK ou à un équilibre 1-1-1.

B. FORME DES APPORTS

1) Engrais simples.

Le choix de la forme des éléments est souvent délicat car il dépend de nombreux facteurs, toutefois nous rassemblerons ici quelques idées directrices déjà vues dans les chapitres précédents.

Azote : Les nitrates sont très peu utilisés en milieu tropical en raison de leur hygroscopicité et de leur trop grande solubilité. L'emploi du sulfate d'ammoniaque est très utilisé et s'avère d'un emploi pratique toutefois il est recommandé de lui associer un amendement ou du fumier pour éviter une acidification du sol. L'urée est à préconiser lorsqu'il n'y a pas un besoin certain en soufre.

Phosphore. Le choix entre les différentes formes d'engrais phosphatés est délicat. Il est certain que les formes les moins solubles demandent une pluviométrie suffisante pour manifester leur effet. Les phosphates locaux sont intéressants à proximité des centres d'exploitation et en fumure de fond ce qui limite leur utilisation aux cultures stables où l'on peut valoriser une fumure sur plusieurs années.

Les concentrations en éléments fertilisants interviennent également dans le choix de l'engrais. En effet des concentrations ici très variables (18 % de P_2O_5 pour le superphosphate et 50 % pour le phosphate d'ammoniaque, conduisent à des différences de prix importantes en raison des frais de transport.

En règle générale ce sont les formes de phosphate les plus concentrées et à action rapide qui sont retenues en vulgarisation.

Enfin il ne faut pas oublier que toutes les formes de **phosphates** ne sont pas susceptibles d'être mélangées avec les autres engrais. Il n'est pas conseillé par exemple d'associer le phosphate monocalcique au sulfate d'ammoniac.

2) Engrais composés

Pour déterminer le choix d'un engrais composé il faut tenir compte des critères suivants :

- Dosage en éléments fertilisants.

Du point de vue économique il faut tenir compte du prix de l'unité fertilisante et non de celui du sac.

En effet les engrais concentrés permettent des économies de transport, de manipulation, de sacherie, qui font que le prix de l'unité fertilisante est souvent moins chère malgré le prix du sac élevé.

D'un autre côté il est plus facile d'épandre les fumures avec des dosages faibles ou moyens.

- Equilibre entre les éléments.

Il faut choisir la formule marchande la plus rapprochée possible de celle préconisée par les services de vulgarisation et ne pas se laisser séduire par le prix du sac. En effet l'azote est l'élément le plus cher aussi le fabricant peut obtenir des prix meilleur marché en forçant sur les éléments les moins chers, en particulier la potasse.

- Forme des éléments

Comme nous l'avons vu pour les engrais simples la forme des éléments peut avoir une grosse importance suivant les conditions d'emploi. En particulier la forme sous laquelle se présente l'acide phosphorique est un élément important d'appréciation d'un engrais composé.

Les étiquettes des sacs portent obligatoirement tous les renseignements sur le dosage, la formule et la forme sous laquelle se trouve les divers éléments.

Type d'étiquette d'engrais composés.

RAISON SOCIALE DU PRODUCTEUR	
Composition minimum garantie de l'ENGRAIS X 16 - 12 - 6	
16 POUR CENT D'AZOTE dont :	
7,65 Nitrique	(5,7 du Nitrate d'Ammoniaque. 1,95 du Nitrate de Potasse.
8,35 Ammoniacal	(5,7 du Nitrate d'Ammoniaque. 0,7 du Phosphate d'Ammoniaque. 1,95 du Chlorhydrate d'Ammoniaque.
12 POUR CENT D'ACIDE PHOSPHORIQUE, dont :	
3,8	soluble à l'eau du Phosphate d'Ammoniaque.
8,2	soluble au Citrate du Phosphate Bicalcique.
6 POUR CENT DE POTASSE soluble à l'eau, du Nitrate de potasse	

2) Engrais simples ou engrais composés.

Dans ce domaine il est impossible de fixer une règle générale, il faut prendre en considération le prix de revient, la commodité d'emploi et l'opportunité technique.

Prix de revient

Il ne s'agit pas évidemment du prix d'achat de l'unité fertilisante mais du prix de revient de l'unité fertilisante épanchée dans le champ. De nombreux frais secondaires doivent entrer dans ce calcul de rentabilité (manutention, stockage, mélange éventuel pour les engrais simples, épandage). Ce bilan est évidemment fonction des données particulières à chaque exploitation.

Commodité d'emploi

En vulgarisation, dans les conditions actuelles d'exploitation des pays

tropicaux, il est beaucoup plus facile de conseiller l'emploi d'un engrais composé judicieusement choisi : un seul produit à manipuler, pas de mélange éventuel à faire, un seul épandage à effectuer. Les causes d'erreur sont ainsi très réduites et le gain de temps est très apprécié dans ces pays où les travaux culturaux effectués manuellement ne laissent que peu de temps libre.

Oportunité technique

Certes les engrais composés obligent à apporter l'azote à la même époque que le phosphore et la potasse, or la différence de comportement dans le sol de ces éléments devrait conduire théoriquement à épandre le premier élément en début de végétation et les deux autres au moment des labours. Dans la pratique il est toujours possible de trouver un compromis entre ces exigences en choisissant par exemple des formes de phosphates à action rapide.

C. MODES D'APPORT

Dans ce cours nous ne donnerons qu'un aperçu théorique de ce problème, les cas particuliers ayant été étudiés dans le cours d'Agriculture spéciale.

Le placement pourrait être défini, au sens large, comme étant la méthode d'application de l'engrais qui en assure l'absorption maximum par la plante, toutes autres conditions restant égales.

Ainsi, le mode d'incorporation au sol, le fractionnement qualitatif et quantitatif dans le temps, la fréquence et l'époque d'épandage constituent divers aspects du placement des engrais.

Le choix du placement dépend essentiellement de la nature chimique de l'élément fertilisant, laquelle conditionne son interaction avec le sol, de certains aspects de la phénologie et du rythme physiologique du végétal, et enfin du coût de l'opération.

En ce qui concerne les éléments majeurs, on se souviendra que l'azote, sous sa forme nitrique on particulier, et le phosphore constituent pratiquement les points extrêmes de l'échelle de mobilité dans le sol ; les risques de lixi-

viation sont grands pour l'azote tandis que les risques de fixation sont élevés pour le phosphore. Les autres éléments fertilisants occupent des positions intermédiaires, le potassium notamment se situe relativement près de l'azote dans le cas des sols ferrallitiques. On peut recommander les modalités suivantes d'application des engrais :

1) Les plantes annuelles

Le fractionnement dans le temps de la dose annuelle d'engrais composé serait d'autant meilleur que le sol est plus léger.

Si des engrais simples sont utilisés, le phosphore et le potassium peuvent généralement être donnés lors du semis ou de la plantation, l'azote étant de préférence fractionné.

En pratique, deux ou trois époques d'application de l'azote sont susceptibles d'être retenues, la première se situant en début de végétation, la dernière au plus tard avant le début de la croissance végétative maximum.

Lorsque les contingences locales ne permettent d'effectuer qu'un seul épandage annuel, il se situe de préférence près du semis pour les sols plus argileux et plus tardivement, par exemple au second démariage dans le cas du cotonnier, pour les sols plus sablonneux.

Le placement superficiel en ligne ou en poquet à proximité de la graine donne généralement satisfaction. Il n'est cependant pas exclu de penser qu'un placement de l'engrais en profondeur donnera de meilleurs résultats dans certains cas.

2) Les plantes pluriannuelles (caféier, palmier, cacaoyer, hévéa, etc...).

Il paraît utile d'incorporer du phosphore dans le trou de plantation de préférence par apport d'un compost enrichi en phosphore, ou à défaut par le mélange d'engrais phosphatés à la terre de remplissage.

Deux épandage annuels au début de la saison des pluies constituent un fractionnement suffisant dans la majorité des cas. En régions équatoriales, à saison sèche peu marquée, l'épandage en fin de saison pluvieuse serait plus efficace, notamment pour certains raisons d'ordre physiologique.

Dans les sols peu argileux, un épandage superficiel suffit lorsque l'engrais est recouvert par litière ou le paillis préalablement dégagés. Sinon, il sera utile de procéder à un grattage du sol de façon à enfouir superficiellement l'engrais pour éviter les déplacements latéraux. L'épandage au lendemain d'une bonne pluie peut être recommandé d'une manière générale, de façon à faciliter son incorporation au sol.

La zone d'épandage doit s'inspirer du développement radiculaire de la plante. La projection sur le sol de la couronne de l'arbre délimite approximativement une circonférence. Une couronne large d'une trentaine de centimètre et s'étendant de part et d'autre de cette circonférence constitue dans le jeune âge la zone favorable d'application de l'engrais. A l'âge adulte, l'application à la volée et en bandes continues dans les interlignes peut être satisfaisant, les racines ayant pratiquement colonisé les interlignes. Un rabattage de la plante de couverture ou du recrû naturel sera pratiqué de façon à dégager la zone d'épandage.

A ce propos, il faut toujours veiller à ce que l'engrais épandu ne profite pas principalement à la plante de couverture plutôt qu'à la culture. Un contrôle soigneux du recrû naturel et des graminées adventices constitue une condition majeure du succès de l'opération.

Dans le cas de sols plus argileux, de nombreux auteurs conseillent d'enfouir le phosphore en poches localisées ou en sillons d'une vingtaine de centimètres de profondeur et situés dans les zones d'épandage décrites ci-dessus. Si des engrais composés sont utilisés, ces auteurs préconisent alors d'effectuer annuellement un épandage superficiel et un second épandage enfoui.

D. FUMURES DES PRINCIPALES CULTURES

1 - LE RIZ

Forme d'apport des éléments minéraux

Les essais comparatifs montrent presque toujours la supériorité de l'azote ammoniacal sur l'azote nitrique sauf lorsque celui-ci est appliqué au moment de l'épiaison.

On peut admettre que le choix de l'engrais ammoniacal dépend essentiellement du coût de l'engrais, du prix de transport de l'unité d'azote, des plus ou moins grandes facilités de se procurer l'engrais, et de sa conservation.

Pour ce qui est du phosphore et de la potasse tous les engrais se sont montrés aussi efficaces les uns que les autres.

Le fumier est peu utilisé, par contre les enfouissements de paille avec ou sans fumure complémentaire est d'un usage courant, les accroissements de rendements peuvent atteindre plus de 20 %.

Doses

Dans les régions tropicales la fumure phosphatée seule donne parfois d'excellents résultats dans certains sols, les sols acides notamment, mais le plus généralement c'est la fumure azotée qui donne les meilleurs résultats.

A l'Office du Niger on a obtenu des suppléments de récolte de 23 à 40 Kg de paddy par unité d'azote pour les doses qui variaient de 30 à 60 unités/ha.

A Madagascar (Alaotron) une fumure complète 60 kg N, 125 Kg P_2O_5 , 100 kg K_2O a donné un rendement de 172 % par rapport au témoin.

Méthode d'application

En général les meilleurs rendements sont obtenus avec un fractionnement des apports d'engrais mais on ne peut fixer de règle générale. Dans les pays

francophones d'Afrique Tropical^e le fractionnement des épandages d'engrais azotés ou phosphatés n'a pas en général donné de résultats significativement supérieurs aux épandages uniques ; cependant à Madagascar on tend à préconiser l'épandage en deux fois : la moitié avant repiquage, l'autre lors du tallage.

Les essais effectués dans de nombreux pays ont montré qu'en général l'enfouissement de l'engrais azoté en profondeur peut renforcer l'efficacité de cet engrais de 50 à 60 %. En Afrique Tropical on n'a pas constaté de différences sensibles entre les profondeurs d'enfouissement de l'engrais azoté.

2. SORGHO ET MILS

L'azote est l'élément le plus marquant de la fumure. On peut conseiller un apport de 100 à 200 kg/ha de 14 - 7- 7 la dose variant avec les conditions naturelles.

Il faut noter que la culture du mil ou du sorgho est très délicate (importance de la date de semis, démariage, binages) et sensible à la moindre variation du milieu. La plus petite erreur ou insuffisance dans une technique culturale provoque une baisse de rendement spectaculaire. L'action propre de l'engrais sera d'autant plus valorisée qu'elle s'exercera sur un milieu favorable.

3. L'ARACHIDE

Il semble tout d'abord que les doses d'engrais à appliquer doivent être faibles (100 à 150 kg/ha), de nombreux exemples ont montré que des doses plus élevées ne sont pas rentables.

La forme d'apport des éléments minéraux sur arachide est surtout importante pour le phosphore et le soufre. Les essais effectués par l'IRHO ont montré que dans les zones Nord du Sénégal le phosphore devait être apporté sur chaque culture et sous une forme soluble. Dans le Sud l'introduction du phospal en fumure annuelle et en mélange avec une forme plus soluble est justifiée.

L'effet du soufre sur les rendements de l'arachide est important. Il est donc nécessaire qu'il soit inclus dans le formule de fumure, soit sous forme de sulfate d'ammoniaque, soit de superphosphate par exemple.

Les formules préconisées sont variables suivant les régions toutefois la plus utilisée est le 6 - 20 - 10. Dans certaines régions certaines formes contenant deux éléments minéraux simplement peuvent être particulièrement rentables c'est le cas des superphosphates par exemple (carence en P et S). A Kaolak (Sud Sénégal) le soufre et le phosphore assurent à eux seuls 80 % de l'augmentation de rendement, une formule apportant 6 kg de S et 15 kg de P_2O_5 à l'hectare assurait une rentabilité maximum de l'argent investi. Bien entendu ces formules simples ne sont à utiliser que dans une première phase de développement, il faut revenir ensuite à des formules plus complètes.

4. LE MANIOC

Dans les systèmes traditionnels de culture le manioc n'est pas fumé aussi les rendements obtenus sont-ils assez médiocres.

Les études effectuées à Madagascar montrent que les engrais minéraux ne doivent constituer qu'une fumure d'appoint. Le fumier de ferme à la dose de 20 à 30 t/ha est complété soit par une fumure potassique (100 unités) pour favoriser la formation de fécule dans les racines, soit dans le cas de sols riches en potasse par un apport de phosphates de fumure de fond.

Toutefois il faut avant de donner de fortes fumures minérales améliorer le matériel végétal, les variétés locales ne pouvant rentabiliser l'emploi des engrais.

5. LE BANANIER

L'IFAC a mis au point une technique de fumure à Kindia (Guinée) qui permet d'obtenir des rendements élevés (40 t/ha et plus).

D'abord une fumure organique très importante (200 t de fumier artificiel ou paillage) avec un chaulage, s'il y a lieu, pour ramener le pH à 6,5 - 7.

La fumure minérale par pied comporte : tous les 2 - 3 ans, 150 - 200 g d'acide phosphorique ; tous les ans et en plusieurs épandages, 100 à 200 g d'azote et 300 à 500 g de potasse. On a tendance à diminuer la proportion de potasse dans la fumure et à la ramener à 3 pour 1 d'azote pour la variété Petite Naine et 2 de potasse pour 1 d'azote pour le Poyo. (A signaler qu'aux Antilles les doses utilisées sont inférieures d' $1/3$ environ). On emploie aussi beaucoup d'engrais composés sur bananiers, d'un équilibre 1 - 1 - 3 ou 1 - 2 - 5, des apports d'azote seul rétablissant l'équilibre souhaité. Le nombre d'épandages d'azote est élevé même avec des engrais comme l'urée et le sulfate d'ammoniaque, il atteint la dizaine à Kindia où il tombe 2 m d'eau, la demi-douzaine aux Antilles. Aussi a-t-on essayé l'azorgan (engrais organique de synthèse) pour échapper au lessivage intense de l'azote. Là où la banane n'est pas cultivée en plein, mais en association avec le café et le cacao (Cameroun notamment), la fumure est beaucoup trop négligée.

Dans le Mungo, au Cameroun, les besoins moyens pour la banane Poyo, peuvent être ainsi définis :

Première année.

1 mois après plantation	:	100 g SO_4NH_4	
2 mois " "	:	" "	
3 mois " "	:	" " + 50 g de K	
4 mois " "	:	" " " "	

Deuxième année.

Début de mars	:	100 g SO_4NH_4	
Fin avril	:	100 g SO_4NH_4	+ 50 g de K
15 Octobre	:	200 g SO_4NH_4	+ 50 g de K

Troisième année.

Début mars	:	100 g SO_4NH_4	
Fin avril	:	100 g SO_4NH_4	+ 50 g de K
15 octobre	:	100 g SO_4NH_4	

En général on replante au bout de trois ans sinon les épandages d'engrais doivent être continués au même rythme.

Conditions d'un bon épandage

- 1) Désherber et nettoyer au préalable autour des pieds.
- 2) Ne pas épandre à la poignée. Utiliser des boîtes de mesures tarées.
- 3) Répartir l'engrais régulièrement autour du pied en végétation sur 50 cm de rayon.
- 4) Ne pas épandre en période pluvieuse.
- 5) Un léger binage superficiel après épandage est nécessaire pour éviter la perte d'engrais.

6. L'ANANAS

Les quantités totales d'engrais appliquées à l'hectare pour l'obtention du premier fruit (soit pour une période moyenne de dix-huit mois), sont considérables au regard d'autres plantes. Même dans les sols relativement "riche", on applique maintenant couramment, quand la production est destinée à la conserverie, 8 à 14 g d'azote et 10 à 20 g de K_2O par pied, soit respectivement pour 50 000 pieds/ha : 400 à 800kg de K_2O , mais seulement 0 à 5 g de P_2O_5 , soit au maximum de l'ordre de 250 kg de P_2O_5 .

En ce qui concerne le magnésium, les chiffres sont éminemment variables. Là où il fait défaut on applique des quantités de MgO qui peuvent correspondre au quart, voire à près de la moitié de la quantité de K_2O .

Quand la production est destinée à l'exportation en frais, le premier des deux chiffres donnés pour l'azote est habituellement un maximum ; pour la potasse, le maximum est de l'ordre de 15 g.

Azote : C'est le sulfate d'ammoniaque (20 à 21 d'azote) qui donne habituellement les meilleurs résultats pour l'ananas, mais il tend de plus en plus à céder la place à l'urée (perlurée : 45 ou 46 % d'azote), moins chère à l'unité d'azote et qui a l'avantage de pouvoir s'appliquer sur le feuillage à des concentrations de 5 à 10 % sans provoquer de brûlure, du moins en l'absence de biuret. Mais on

notera qu'à l'unité d'azote, l'urée donne habituellement des résultats inférieurs au sulfate d'ammoniaque, ceci est la conséquence, semble-t-il, de pertes d'azote dans l'atmosphère au moment de l'ammonisation ou avant par lessivage, et non à l'absence de soufre dans l'urée. Les nitrates, non fixés sur le complexe absorbant, donc facilement lessivés, donnent généralement des résultats inférieurs quand ils sont appliqués au sol, mais conviennent bien pour des applications sur le feuillage à faible concentration, en particulier le nitrate de potasse (13 % d'azote + 44 % de potasse) et le nitrate d'Ammoniaque (35 % d'azote), ce dernier composé donnerait même des résultats supérieurs à l'urée.

Le phosphate d'ammoniaque (17,5 à 20 % d'azote + 40 à 52 % d'acide phosphorique) peut également s'appliquer en solution sur le feuillage ; son emploi est tout spécialement intéressant à l'approche de la différenciation de l'inflorescence. Le nitrate de sodium (13 à 15,5 % d'azote) ne sont habituellement pas utilisés en culture d'ananas.

On signalera enfin que l'ammoniac-anhydre (82 % d'azote) commence à être utilisé en culture d'ananas : on l'injecte dans le sol avant plantation.

Potasse : de l'avis de tous les expérimentateurs le sulfate de potasse (48 % de potasse) donne des résultats très supérieurs au chlorure de potasse sur l'ananas, au double point de vue rendement et qualité ; la présence de l'ion Cl dans le second serait à l'origine de cette différence. On peut cependant utiliser du chlorure de potasse avant la plantation, sans que cela semble avoir une action dépressive sur la qualité des fruits, mais il est vivement recommandé de ne plus en faire usage ensuite.

Les fabrications courantes de sulfate de potasse se dissolvent imparfaitement dans l'eau, ce qui pose certains problèmes techniques pour l'application par pulvérisation sur le feuillage du mélange binaire azote-potasse. C'est la raison pour laquelle on a fait appel dans certains pays, et en particulier en Martinique, au bicarbonate de potasse (46 % de potasse) qui se dissout parfaitement dans l'eau, jusqu'à ce que sa fabrication industrielle soit arrêtée. Mais, comparé en essai au sulfate de potasse, il a donné (à l'unité de potasse appliquée) des résultats inférieurs à ce dernier sans que l'on puisse pour cela attribuer cette différence à l'élément soufre.

Phosphore : A côté du phosphate d'ammoniaque, déjà signalé, il existe toute une gamme d'engrais phosphatés qui conviennent à l'ananas. Plus ou moins solubles et riches en chaux, le choix est fonction de l'époque du cycle d'application et du pH des sols. En cours de végétation, les superphosphates (14 à 50 % d'acide phosphorique) sont plus utilisés que les autres formes.

Parmi la gamme d'engrais binaires ou tertiaires proposés dans le commerce, peu sont bien adaptés à l'ananas :

- soit parce qu'ils contiennent des engrais peu recommandés pour cette plante (chlorure, nitrate ...)
- soit parce que les rapports entre les constituants ne correspondent pas aux besoins de la plante (trop de phosphore, en général).

7. LE PALMIER A HUILE

Les carences en azote et phosphore sont très rares et la fumure en ces deux éléments ne semble, dans les conditions actuelles pas indispensables sur les arbres adultes. Il est recommandé, sur les jeunes palmier, un apport d'1 kg de sulfate d'ammoniaque par arbre.

Au Cameroun l'IRHO continue à mettre au point la fertilisation du palmier. On note un effet important de la potasse surtout à partir de la dixième année. Une application annuelle de 1 kg de ClK semble suffisante.

Il a été également constaté une carence magnésienne dans le jeune âge, qui disparaît entre 4 et 6 ans pour réapparaître et s'accroître à l'âge adulte. Des apports de 1 kg 5 de sulfate magnésique corrige cette carence. On peut également apporter soit de la magnésie calcinée soit de la kiererite.

8. LE COCOTIER

Trente-cinq expériences implantées suivant des schémas statistiques précis étudient l'action de divers engrais (minéraux ou organiques) sur les teneurs des feuilles et les rendements. Elles précisent pour chaque situation l'ordre des facteurs limitants et l'importance des réponses aux engrais.

Azote :

Les causes de la carence azotée du cotier sont maintenant bien connues ; ce sont le plus souvent :

- une pluviosité faible ou mal répartie réduisant la période de nitrification et la durée d'activité de la partie absorbante du système racinaire ;
- des conditions pédologiques défavorables à une bonne évolution de l'azote : calcaires coralliens des atolls, sables lessivés par les variations du niveau d'une nappe phréatique à faible profondeur, par exemple ;
- un mauvais entretien : dans une cocoteraie envahie de graminées (grosses consommatrices d'azote), les teneurs des feuilles sont généralement faibles.

Suivant les situations, la carence azotée peut être corrigée :

1) en appliquant l'azote à la bonne époque, généralement au début des pluies dans les régions à pluviosité faible ou mal répartie.

2) en installant une couverture de légumineuses aux nodosités nombreuses et actives, qui contrôle économiquement les graminées, fixe des quantités non négligeables d'azote et améliore les qualités physiques du sol.

3) en effectuant des apports de matières organiques (fumier ou gadoues) s'il est possible de s'en procurer à peu de frais ; leurs effets sont indéniables sur le rendement.

Les résultats les plus nets ont été enregistrés au Mozambique :

- la couverture permanente de *Pueraria* accroît les rendements de plus de 50 % (cf. rapport antérieur) ;
- l'application du sulfate d'ammoniaque accroît significativement les teneurs en azote au bout d'un an et le coprah total (nombre de noix et coprah/noix au bout de deux ans).

Phosphore

Les effets du phosphore, étudiés seul, ou en association avec N et K sont positifs mais généralement faibles. En Côte d'Ivoire, sur cocoteraie de douze ans, et en présence de potasse, ils sont plus marqués.

Cette action positive se retrouve au Dahomey où, dans des conditions analogues, existe une corrélation positive très significative entre teneurs des feuilles en P (D.F. de 1965) et nombre de noix/arbre (Campagne 1965-1966) $r = + 0,861$.

Potasse

Comme le potassium est l'élément dont le cocotier exporte les plus grandes quantités, toute modification de milieu entraînant un accroissement de production, induit, à plus ou moins brève échéance, une déficience en potasse et rend obligatoire une fumure potassique régulière.

La rentabilité de la fumure potassique est remarquable. En Côte d'Ivoire, sur vieille cocoteraie, les arbres fumés régulièrement depuis 1962, on produit en moyenne par an, 7,2 Kg de coprah de plus que ceux n'ayant jamais reçu de KCl ; ce qui correspond à un bénéfice net supérieur à 30 000 f CFA par hectare et par an.

9. LE COTON

Au Cameroun l'IRCT conseille au stade actuel des recherches, les techniques de fertilisation ci-après.

Sitôt après le démariage on aura intérêt à apporter les fumures locales ou importées.

Il y a lieu d'employer avant tout les fumures organiques disponibles sur place : le fumier de ferme, la terre de kraal, les tourteaux de coton et les graines de coton broyées.

a) Le fumier de ferme est encore assez rare, mais le développement de la culture attelée devrait permettre l'extension de sa fabrication et de son utilisation. Il doit, seul, être incorporé au sol, avant les labours, en quantité variable suivant les disponibilités des cultivateurs (5 t/ha est apport minimum).

b) La terre de kraal est un amalgame naturel de terre et de déjections de chevaux, bovins ou ovins se trouvant dans les parcs ou les cases à bestiaux.

L'épandage se fait après le démariage, avant le buttage, à raison d'une poignée par poquet, soit environ 5 à 10 t/ha. On améliore ainsi la production de 10 à 20 %.

c) Le tourteau de coton est un engrais organique relativement concentré. L'huilerie CFDT de KAELE peut mettre chaque année à la disposition des cultivateurs environ 3 000 t de tourteaux qui permettraient de fumer environ 10 000 ha aux abords de l'usine de KAELE à raison de 300 à 500 kg/ha épandus après le démariage et avant le buttage.

L'amélioration du rendement à l'hectare est de l'ordre de 20 %.

d) La graine de coton broyée pourrait être obtenue dans les usines d'égré-
nage de la CFDT autres que celle de KAELE, les graines n'y étant pas utilisées en huilerie.

Les frais occasionnés par le broyage des graines et leur transport aux lieux proches d'utilisation sont relativement peu élevés en tenant compte de l'amélioration apportée.

L'épandage au démariage de 500 à 1 000 kg/ha de graines de coton broyées augmente les rendements de 15 à 25 %.

Pour tous les secteurs qui, par leur situation, ne peuvent profiter de ces fumures organiques d'origine locale, peut coûteuse, l'épandage au démariage de 100 kg/ha de sulfate d'ammoniaque et de 50 kg de phosphate bicalcique peut être envisagé à condition que le rendement de base habituel soit supérieur à 500 kg/ha afin d'être assuré de la rentabilité de l'opération. L'amélioration des rendements varie de 20 à 30 % suivant les sols.

Ces diverses possibilités de fertilisation des sols ne devraient pas être négligées si l'on ne veut pas irrémédiablement compromettre la fertilité des sols et placer d'ici quelques années les cultivateurs dans une situation très difficile

L'épandage de ces fumures doit être fait régulièrement et avec précaution afin d'éviter les brûlures et pourrissements des plants. Il suffit de les épandre au milieu des interlignes sans jamais approcher le collet des plants à moins de 10 cm. Le buttage qui suivra immédiatement ces épandages rapprochera et enfouira les éléments fertilisants alors mélangés à la terre arable.

10. LE CAFÉIER

Le caféier est un arbre qui porte ses fruits sur le bois d'un an. Ce fait doit être à la base de la fumure car il implique que la nutrition d'une année agit autant et peut être davantage sur la production de l'année suivante. Donc dans la fumure une partie des éléments nutritifs apportés est utilisée à nourrir la récolte de l'année et à compenser ses exportations, tandis que l'autre fraction sert à promouvoir la récolte de l'année suivante.

En Côte d'Ivoire A. LOUE recommande deux formules différentes suivant qu'on se trouve sur les sables tertiaire (40 g N - 40 g P_2O_5 - 80 g K_2O) ou dans les régions granitognassique (50 g - 30 g - 50 g). La fumure sera fractionnée en 3 épandages pour l'azote (mars, juillet, octobre), 2 pour la potasse (mars et octobre), 1 seul pour P_2O_5 (mars).

Au Cameroun sur les terres volcaniques Mme BENAC a montré que l'azote constitue le facteur limitant il ne faut pas pour autant négliger les autres éléments cela revient simplement à dire qu'il faudra des doses d'azote relativement élevées pour que les autres éléments soit marquant dans l'état actuel des sols. Les composés les plus utilisés sont le 15-6-8 et le 12-6-20.

La prise en compte du critère oronomique fait ressortir d'une façon générale (à l'exception des sables tertiaires de Côte d'Ivoire très carencés en potasse) la prédominance de l'azote.

Toutefois les fortes doses applicables pour soutenir des rendements très élevés rendent compte du besoin d'apporter progressivement les autres éléments (P, K, oligo-éléments) à la culture.

11. LE CACAOYER

Les études portant sur la fertilisation du cacaoyer ont souvent donné des résultats contradictoires. Il semble avant tout qu'une bonne conduite de la plantation soit le facteur déterminant pour obtenir une réponse aux engrais.

Toutefois les recherches menées par LOUE en Côte d'Ivoire lui ont permis de faire les recommandations suivantes. Tant que les recherches sur la nutrition de l'arbre et sa fertilisation ne sont pas plus avancées, les systèmes de fumure suivants sont conseillés :

Région sablo-argileuse côtière

(NPK) 1

{	N	= 60 g soit 300 g de sulfate d'ammoniaque
	P ₂ O ₅	= 50 g soit 125 g de phosphate bicalcique
	K ₂ O	= 100 g soit 200 g de sulfate de potasse ou 60 - 60 - 100 ou 60 - 60 - 120.

Région granito-gneissique

(NPK) 2
ou (NPK) 3

{	N	= 60 g soit 300 de sulfate d'ammoniaque
	P ₂ O ₅	= 80 g soit 200 g de phosphate bicalcique
	K ₂ O	= 60 g soit 125 g de sulfate de potasse = 60-80-80

Région schisteuse

(NPK) 4

{	N	= 60 g soit 300 g de sulfate d'ammoniaque
	P ₂ O ₅	= 50 g soit 125 g de phosphate bicalcique
	K ₂ O	= 60 g soit 125 g de phosphate bicalcique

Cette formule convient aux cacaoyères dont les possibilités chimiques sont assez élevées ; mais dans la pratique les cacaoyères de la région schisteuse se cantonnent des bas-fonds humides dont la structure physique est beaucoup plus favorable que celle des plateaux, mais dont les possibilités chimiques peuvent être inférieures à celles des cacaoyères sur granites calco-alcalins.

On choisira alors (NPK)3 ou (NPK)5 = 60-60-80.

Ces doses annuelles par arbre sont fractionnées deux épandages :

1er épandage : mi-avril : $3/5 N - 1/2 P_2O_5 - \frac{1}{2} K_2O$

2e épandage : fin septembre : $2/5 N - \frac{1}{2} P_2O_5 - \frac{1}{2} K_2O$.

L'engrais est placé sur une couronne située entre 1 m et 1,50 m du pied de l'arbre et on le recouvre du paillage des feuilles. Selon les récentes études de VAN HILME sur l'épandage à la volée dans les interlignes, car c'est là que se trouvent concentrées la majorité des racines absorbantes. Mais la méthode pratique serait également bonne.

V. MARCHE DES ENGRAIS EN AFRIQUE CENTRALE

L'utilisation des engrais s'étend rapidement depuis plusieurs années comme le montre une étude réalisée par le SOCIÉTÉ D'ENGRAIS et de PRODUITS CHIMIQUES D'AFRIQUE EQUATORIALE.

1958	10 409 tonnes
1959	11 564 "
1960	15 060 "
1961	17 580 "
1962	22 430 "
1963	24 695 "
1964	39 103 "
1965	44 174 "

Cette évolution, marquée par une augmentation très sensible ces dernières années, est due en grande partie à l'action des secteurs de modernisation et à partir de 1964, aux subventions versées ainsi qu'aux conditions de crédit consenties par les fournisseurs. Ces derniers consentent en effet des crédits sur huit mois et s'occupent eux-mêmes de toucher la subvention.

Dans le domaine du café, qui représente l'utilisateur le plus important la caisse de stabilisation a subventionné 50 % des engrais en 1964. Grâce aux fonds mis à la disposition du Gouvernement par le FED cette mesure s'est poursuivie avec des taux de subvention décroissant de 50 à 10 % pour les années 1965 à 1970.

Ces encouragements ont entraîné non seulement une utilisation de quantités supérieures d'engrais par les anciens acheteurs mais également la demande nouveaux producteurs qui ont voulu profiter des bas prix pratiqués.

Répartition par culture

En 1965 la répartition entre les différentes cultures de la consommation en engrais s'établissait comme suit :

CULTURES	TERRITOIRE INTERESSES	TONNAGE	%
Café	Cameroun - Centrafrique	29 850	67,6
Coton	Tchad - Cameroun - Centrafrique	2 700	6,2
Canne à sucre	Congo	6 125	13,9
Bananier	Cameroun	3 650	8,3
Palmier à huile	Cameroun - Congo - Gabon	700	1,6
Hévéa	Cameroun - Centrafrique	400	0,9
Théier	Cameroun	100	0,2
Cacaoyer	Tous Etats sauf Tchad	150	0,3
Divers (Tabac- riz ...)		499	1
		<u>44 174</u>	<u>100</u>

On estime qu'en 1970 - 1972 les besoins se situeront aux alentours de 90 000 t, cette évolution est peut-être un peu optimiste, elle tient compte de la réalisation des grands projets agricoles à l'étude en cours.

Part des différents Territoires.

Le Cameroun a représenté à lui seul au cours des huit dernières années 75 à 95 % du marché de l'Afrique Centrale. On prévoit que ce pourcentage diminuera dans les quelques années à venir mais restera encore aux alentours de 60 à 65 %.

Voici comment se présentait la répartition entre pays en 1965 :

CAMEROUN	34 400	78	%
Congo	6 300	14,3	%
Tchad	1 850	4,2	%
Centrafrique	1 450	3,3	%
Gabon	100	0,2	%

On notera que pour le Congo et le Tchad la consommation est quasiment le fait d'une monoculture, canne à sucre au Congo et Coton au Tchad.

Répartition par catégorie d'engrais en 1965

Engrais azotés	30 016 tonnes	70	%
Engrais phosphatés	1 052 "	2	%
Engrais potassique	5 656 "	12	%
Engrais composés	7 275 "	16	%

Cette répartition fait apparaître l'importance des ventes d'engrais azotés, essentiellement le sulfate d'ammoniaque.

Cette prépondérance presque absolue de la fertilisation azotée à base de sulfate d'ammoniaque s'explique pour des raisons commerciales c'est l'engrais le moins cher et le plus spectaculaire. Du point de vue agronomique cela ne se justifie pas et on doit prévoir une place plus importante pour la fumure complète.

La fertilisation phosphatée reste faible et limitée à peu près à la culture du coton. L'engrais à peu près exclusivement utilisé est le phosphate bicalcique.

La fertilisation potassique représente en 1965 18 % en tonnage de la consommation des engrais.

Les engrais composés représente 6 % en tonnage. Cette proportion ne peut qu'augmenter dans les années à venir. Les plus utilisés sont les suivants :

15 - 6 - 8	4 200 t	Café
12 - 6 - 20	2 400 t	Café - Canne à sucre
20 - 20 - 20	1 200 t	Coton.

Conclusion

En résumé le marché des engrais en Afrique Centrale peut être considéré comme un marché en expansion. Il est possible et prévoir que les besoins globaux atteindront dans quelques années 80 000 à 90 000 t dont :

50 000 à 60 000 t	de sulfate d'ammoniaque
18 000	ClK
2 500 à 3 000 t	supertriple ou phosphate bicalcique
10 000 à 15 000 t	engrais composés.

Le faible tonnage de la consommation en engrais phosphatés ne peut que justifier leur importation en sac et leur ensachage sur place.

Les engrais potassiques pourront être importés en vrac en provenance des mines de potasse du Congo en cours d'installation.

L'importance des engrais azotés pose le problème de leur fabrication sur place.

Au Cameroun l'ammoniaque pourrait être fabriqué sur place à partir du gaz naturel de Logbaba (10 km est de Douala - 400 Millions de m³), on pourrait également envisager une extraction à partir du Naphta lors de la réalisation de la future raffinerie.

Mais la construction d'une unité de production d'ammoniac de synthèse à partir du gaz de Logbaba est hasardeuse. En effet pour qu'une unité de production d'Wtts destinée à l'exploitation soit rentable il faut que sa capacité soit au minimum de 500 t/jour soit 150 000 t/an. Ce seuil de rentabilité sera assez rapidement porté à 1 000 t/jour du fait de la mise en route très prochaine dans le monde de nombreuses unités de grandes dimensions. Or dans les conditions les plus optimistes l'utilisation du gaz de la poche de Logbaba a été envisagée sur la base de 50 t/jour.

La solution possible dans les conditions actuelles est d'envisager une fabrication de 100 t/jour minimum de sulfate d'ammoniac à partir d'acide sulfurique produit localement et d'ammoniaque importé au moins dans un premier temps. Cela nécessitera une production de 22 000 t/an d'acide sulfurique (importation de 7 700 t de S) et l'importation de 7 500 t d'ammoniaque.

L'importance croissante des engrais composés permet d'envisager un atelier de fabrication de 15 000 t/an qui ferait appel à

$$\left\{ \begin{array}{l} 1\ 795\ \text{t d'azote} \\ 1\ 965\ \text{t de P}_2\text{O}_5 \\ 1\ 760\ \text{t de K}_2\text{O} \end{array} \right.$$

Cet atelier de mélange et de granulation pourront être juxtaposé à celui de fabrication du sulfate d'ammoniaque.

Ceci représenterait un investissement de l'ordre de 1 400 millions CFA.

Les dépenses annuelles d'exploitation (matières premières, frais de fabrication, charges financières) ont été évalués par la SEDES à 916,5 millions et les recettes, en prenant pour base les prix pratiques en magasin par l'importation à Douala, à 1 020 millions. La différence entre recette et dépense (103 millions) ne couvre pas les taxes pratiquées habituellement. Il serait donc indispensable pendant une certaine période de supprimer certaines taxes.