

Les sols tropicaux acides

Bernard DABIN

Pédologue ORSTOM, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy

RÉSUMÉ

L'étude des sols tropicaux acides se limite aux sols normalement drainés des régions intertropicales, principalement ultisols, oxisols, alfisols.

L'acidification est aussi bien un phénomène naturel né de la pédogénèse dans les climats tropicaux les plus humides, qu'un phénomène provoqué par la mise en culture et la dégradation progressive, dans toutes les régions étudiées y compris à climat alterné.

Les différentes causes physicochimiques de l'acidité des sols sont présentées : teneurs en cations basiques, en aluminium, capacité d'échange, charges variables minérales et organiques.

L'auteur étudie l'action des facteurs du milieu ; climat, roche-mère, végétation ; des facteurs internes du sol : nature du complexe absorbant, minéralogie des argiles, rôle de la matière organique ; il passe en revue les causes de l'acidification : lessivage du sol, perte des réserves minérales et du pouvoir de rétention au cours de la pédogénèse, pertes des cations basiques après défrichement, par lixiviation, par érosion, ceci sous différents climats et diverses pratiques : brûlis, amendements, plantes de couverture. Les méthodes de lutte contre l'acidification sont passées en revue. Un chapitre particulier est consacré au problème de toxicité aluminique et manganique et son action sur l'alimentation des plantes.

Le problème de l'acidification est enfin élargi à l'ensemble des phénomènes de dégradation du sol : perte de structure, de matière organique, libération d'éléments toxiques, tant sur le plan local qu'à l'échelle du paysage en fonction des transferts verticaux ou latéraux et des types d'évolution de l'humus des sols.

MOTS-CLÉS : Acidité des sols — Charges variables — Toxicité de l'aluminium et du manganèse — Evolution du sol après défrichement — Pertes par lixiviation.

ABSTRACT

ACID TROPICAL SOILS

The study of the acid tropical soils is confined to the normally drained soils of the intertropical zones and mainly to ultisols, oxisols and alfisols.

Acidification is a natural phenomenon resulting from pedogenesis under the most humid tropical climatic conditions as well as a phenomenon caused by the land cultivation and reclamation and the gradual degradation in all the zones under study including those with alternating climatic conditions.

An account of the different physico-chemical causes of the soil acidity is given, namely the basic cation and aluminium contents, the exchange capacity, the mineral and organic variable loads.

The author studies the influence exerted by the environmental factors such as the climate, the parent rock and vegetation and by the internal soil factors such as the type of the absorbing complex, the clay mineralogy, the role of organic matter. He reviews the causes of acidification such as the soil leaching, the loss of the mineral reserves and of the holding capacity during pedogenesis, the losses of basic cations following clearing by leaching and erosion under different climatic conditions and through various methods such as burning, soil improvements and cover crops. A survey is made of the different types of control improvements and cover crops. A survey is made of the different types of control against acidification. A particular chapter is devoted to the problem of aluminium and manganese toxicity and its effect on the plant feeding.

Finally, the problem of acidification extends to the whole phenomena of soil degradation such as the loss of structure, of organic matter, the release of toxic elements at the local level as well as at the landscape level according to the vertical or lateral transfers and to the types of evolution of the soil humus.

KEY WORDS : Soil acidity — Variable loads — Aluminium and manganese toxicity — Soil evolution following clearing — Losses by leaching.

INTRODUCTION

Sous le titre de sols tropicaux acides on peut inclure des formations très diverses, c'est pourquoi nous laisserons de côté les sols hydromorphes, les sols sulfates acides, etc, qui se forment dans des conditions particulières d'inondation avec des accumulations souvent très fortes de matières organiques acides.

Le sujet sera limité aux sols normalement drainés, mais dans ce cas il faut distinguer deux grands groupes : d'une part les sols naturellement acides sous végétation forestière que l'on trouve dans les zones humides où la pluviométrie moyenne annuelle dépasse 1500 à 1700 mm par an, ce sont les sols ferrallitiques de la classification française correspondant aux utisols et oxysols de la « Soil toxonomy », d'autre par des sols qui ne sont que moyennement à faiblement acides sous végétation naturelle, mais qui peuvent s'acidifier rapidement après défrichement. Ce sont les sols des régions à climat alterné, sous végétation de savane avec une pluviométrie annuelle pouvant s'abaisser jusqu'à 1000 mm et même moins, que la classification française dénomme sols ferrugineux tropicaux lessivés, correspondant assez globalement aux alfisols tropicaux de la Soil Toxonomy (Tropudalf — Tropustalf).

Il peut exister des phénomènes d'acidification dans des régions encore plus sèches (moins de 500 mm), mais ils sont plus limités et les facteurs d'appauvrissement agissent plus faiblement sur le pH.

Ces sols acides ou à risque élevé d'acidification recouvrent des surfaces très importantes dans les zones intertropicales d'Afrique, d'Asie, d'Amérique Latine, et correspondent à des régions de peuplement et de mise en valeur.

Pour cette raison il existe déjà un nombre considérable d'études concernant ces sols, leurs propriétés, les problèmes de mise en valeur, de conservation, d'amélioration.

Dans une synthèse rédigée en 1978, Jean BOYER de l'ORSTOM, cite les travaux de 300 auteurs étrangers et Français dont 40 de l'ORSTOM et 60 pour l'ensemble des Instituts du GERDAT qui ont effectué des expérimentations et analyses sur des sols acides, d'environ 40 pays tropicaux : — en Afrique (Côte d'Ivoire, Cameroun, Congo (Brazzaville et Kinshasa), Ghana, Guinée, Kiwu, Niger, Nigeria, Natal, Ruanda, Rhodesia, RCA, Sénégal, Soudan, Sierra Leone, Tanzanie, Tanganyka, Tchad, Togo), Madagascar, Malaisie, Manille, Antilles (Martinique, Guadeloupe), Trinidad, Porto Rico, Amérique du Nord, Amérique du Sud (Brésil « Amazonie, St Paul, Bahia », Colombie, Equateur, Pérou, Guyane) etc.

Nous nous proposons dans cette brève note de résumer les conclusions essentielles de ces études et par ailleurs de donner quelques exemples venant d'études récentes et présenter certains projets de concepts et démarches nouvelles sur le problème des sols acides.

1. LES CAUSES DE L'ACIDITÉ DES SOLS TROPICAUX

L'acidité que l'on mesure globalement par le pH du sol dans l'eau (acidité actuelle) que l'on accompagne généralement d'une mesure de pH dans KCl (acidité potentielle), est liée au déficit de saturation, du complexe absorbant des sols par des cations alcalino-terreux (Ca^{++} et Mg^{++}) et des cations alcalins (Na^+ et K^+). Le Ca^{++} occupe à lui seul 70 % de la somme des cations échangeables. Le complexe absorbant est mesuré par la capacité d'échange, qui outre les cations basiques fixe également des ions H^+ et AL^{+++} échangeables.

La somme de tous ces cations qui représente la CEC n'est pas constante pour un sol donné, mais varie elle-même en fonction du pH.

Parmi les constituants du complexe absorbant, les minéraux argileux possèdent des charges permanentes, cependant les groupes SiOH et AlOH des angles des cristaux, et aussi les groupes COOH et OH des matières organiques associées, libèrent des charges négatives supplémentaires (COO^- , SiO^- , AlO^-) lorsque le pH augmente de l'acidité vers l'alcalinité.

Par convention on mesure généralement la CEC à pH = 7, mais il est nécessaire également de connaître ses variations aux différents pH.

La perte progressive des cations basiques du complexe absorbant s'accompagne d'une baisse du pH et d'un accroissement progressif de Al échangeable. Cet accroissement qui est lent entre pH 7 et 5,4 devient rapide entre 5,4 et 4.

Les graphiques joints (fig. 1 et 2) montrent un exemple de sols ferrallitiques de la région de Taï en Côte d'Ivoire (la somme des charges $\text{S} + \text{Al} + \text{H}$ croît avec le pH, mais présente un minimum autour de pH = 5. (Echantillons prélevés par R. MOREAU).

(a) Action de la roche-mère et du climat

Le déficit de saturation en bases des sols peut être dû à différentes causes ; on invoque souvent la nature de la roche-mère ; en particulier les roches basiques (gabbros, basaltes, diorites, amphibolites) fournissent des sols mieux pourvus en cations alcalino-terreux que certaines roches quartzieuses acides (grès quartzitiques, granites, leucocrates,

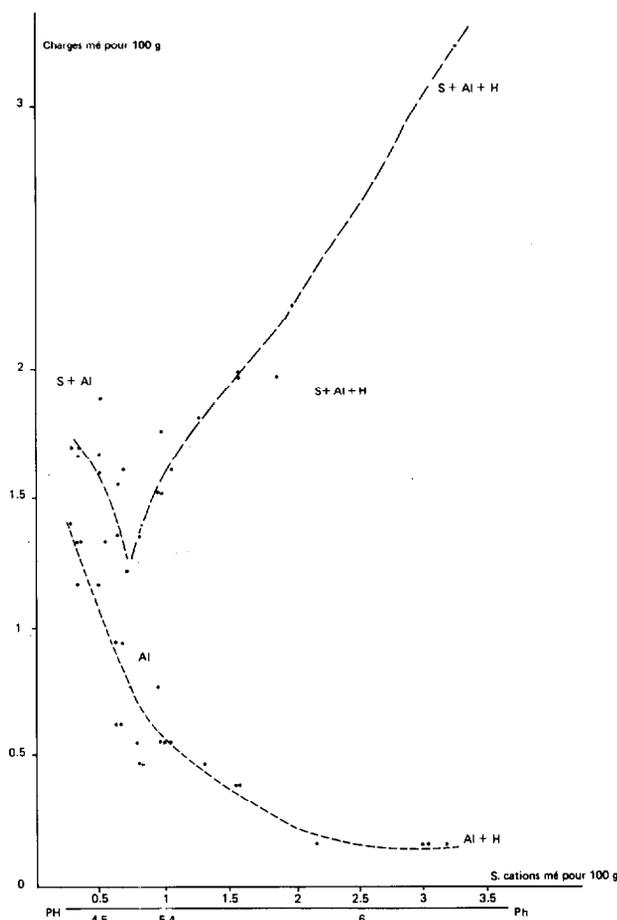


Fig. 1. — Relation entre la somme des cations échangeables (S), le pH et la somme des charges du complexe comprenant S, l'aluminium échangeable H et l'hydrogène échangeable, Al extraits par KCl N. Sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire (Tai) (Ech. MOREAU)

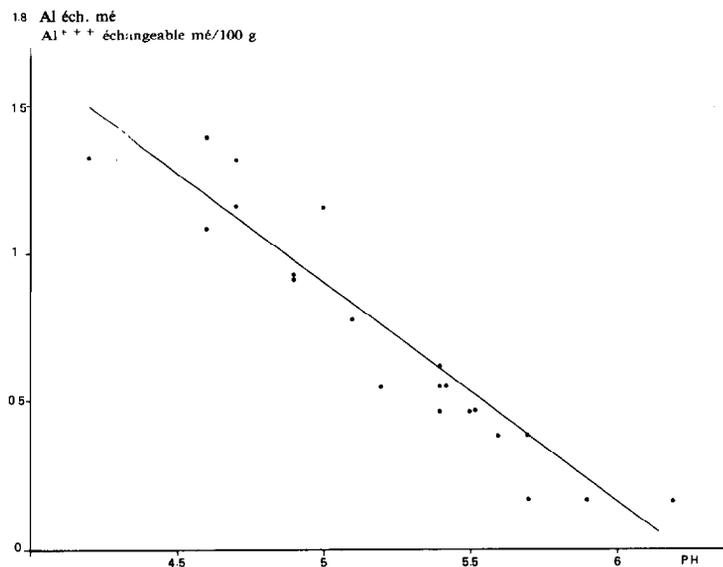


Fig. 2. — Relation entre l'aluminium échangeable et le pH dans des sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire (Tai). (Ech. MOREAU). D'après B. DABIN (1970)

schistes quartzeux, etc.).

Il est connu que de très bonnes terres à cacaoyers ou caféiers du Brésil ou d'Afrique sont dérivées de roches basiques avec des taux de cations échangeables variant de 10 à 20 mé pour 100 g dans les 25 premiers cm du sol, par contre sous les mêmes climats, les sols formés en roches acides sont beaucoup plus pauvres (3 à 5 mé).

Cependant dans les zones très humides où la pluviométrie dépasse 1700 mm et où les sols sont profondément altérés avec une roche-mère à plus de 10 mètres, cette dernière influe peu sur la saturation en cations basiques dont la somme ne dépasse pas 1 à 2 mé en surface quelle que soit la nature pétrographique du matériau originel. Il apparaît donc que le lessivage dû à la pluie et au drainage et l'intensité de l'altération sont deux causes essentielles de l'acidité dans les zones tropicales humides.

Lorsque les sols sont fortement décapés et rajeunis, l'influence de la roche-mère redevient importante sur les bases. D'une manière générale sur une roche-mère donnée, les sols présentent des teneurs en bases et des pH dans l'horizon de surface qui augmentent (par exemple de 4,5 jusqu'à 6,5) lorsque la pluviométrie diminue de 1700 mm à 1000 mm avec augmentation de la durée de la saison sèche (de moins de trois mois à plus de six mois) ; il y a bien sûr de très nombreuses exceptions même sous végétation naturelle.

(b) Action de la végétation

Il est d'observation courante dans la plupart des sols des régions tropicales humides ou semi-humides que l'horizon supérieur des sols est enrichi en bases par rapport aux autres horizons plus profonds. On explique ce phénomène par la restitution régulière d'éléments basiques contenus dans les débris végétaux qui se décomposent rapidement à la surface du sol.

Ces éléments basiques ont été puisés dans des horizons plus

profonds par les racines des plantes, provoquant ce qu'on appelle une « remontée biologique » ; ces apports ont pu être évalués à quelques centaines de Kg par ha et par an sous forêt tropicale, et le Ca est 5 fois supérieur à Mg et à K ; ils compensent en partie les pertes par drainage lorsque le sol est en équilibre ; il est évident que ces remontées sont d'autant plus faibles que l'horizon d'altération des roches est plus profond. La faune du sol, en particulier les termites, peut avoir dans certains cas un effet améliorant sur la richesse en bases à la surface des sols, mais il s'agit généralement d'effets à long terme lorsque les termitières se désagrègent.

Cependant même lorsque les sols sont évolués et profonds, et ne contiennent pratiquement plus de minéraux altérables, il subsiste des réserves en éléments que l'on extrait par des acides forts ; le rapport entre éléments totaux et échangeables qui ne dépasse pas 2 pour le calcium peut atteindre 4 à 40 pour le magnésium et généralement plus de 20 à 40 pour le potassium. On ignore souvent sous quelle forme se trouvent ces réserves, elles peuvent être incluses dans la matière organique, mais aussi dans certains silicates ou enrobée dans des oxydes métalliques.

Par EXEMPLE — Sol ferrallitique du Congo sur formation de grès micacés (Kombé)

Cations échangeables — mé p. 100 g. — ph de surface = 4,7

	0-12 cm	12-45 cm	45-60 cm	60-100 cm
Ca	0,19	0,07	0,03	0,03
Mg	0,07	0,06	0,08	0,13
K	0,05	0,06	0,02	0,02
Na	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>Cations de réserve</i>				
Ca	0,40	0,15	0,15	0,25
Mg	2,22	2,83	3,98	4,48
K	2,23	2,64	3,35	3,69
Na	0,1	0,12	0,11	0,16

Dans des cultures fourragères de basse Côte d'Ivoire, on a pu évaluer que 5 % par an de la réserve potassique pouvait être utilisée par les plantes, mais ce chiffre est certainement très variable suivant les sols.

(c) Action de la nature du complexe absorbant

Dans les régions tropicales humides la capacité de sorption des bases par le complexe d'échange est habituellement assez basse, ceci est dû en particulier à la dominance quasi générale des argiles kaoliniques dans la majorité de ces sols (environ 10 mé pour 100 g ou 0,1 mé par % d'argile).

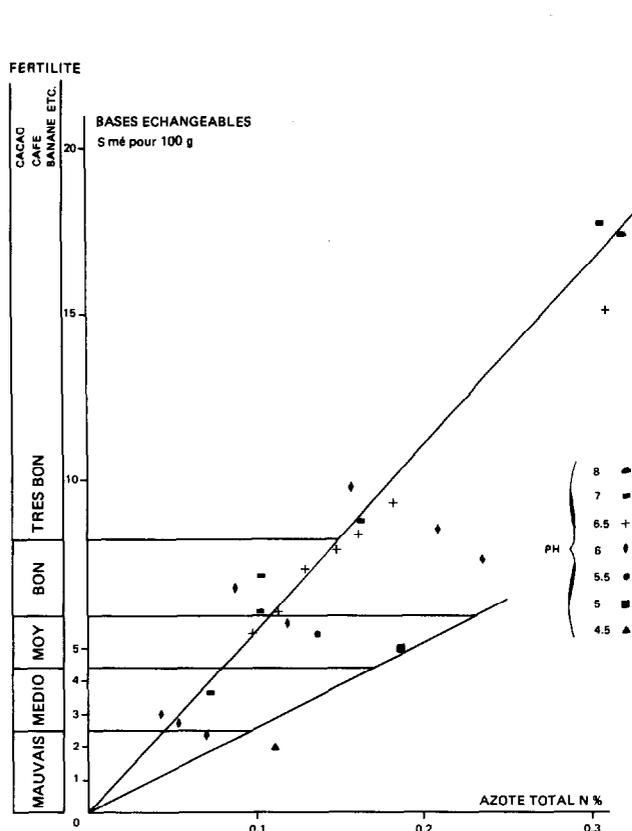


Fig. 3. — Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques faiblement désaturés (Côte d'Ivoire)

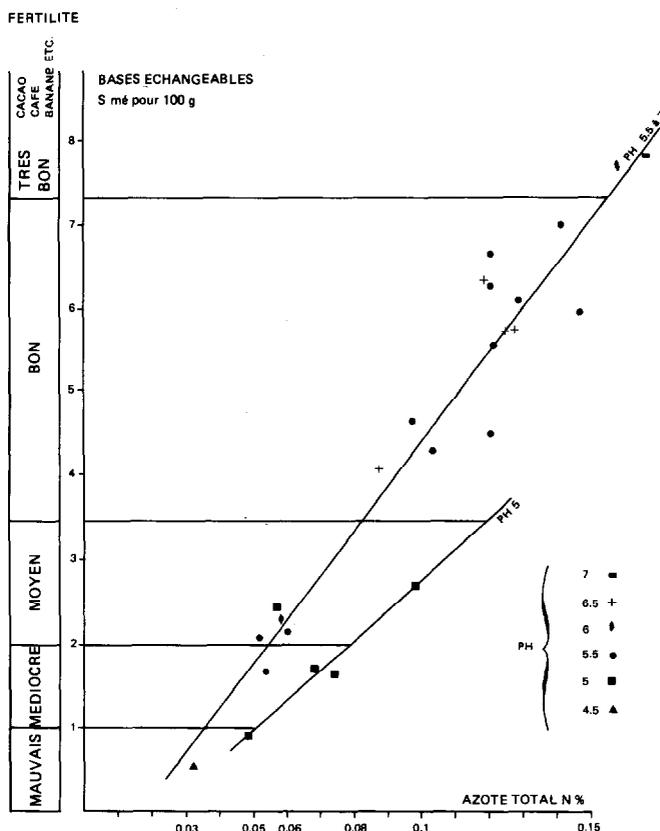


Fig. 4. — Relation entre la somme des bases échangeables, la teneur en azote total et le pH dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés (Côte d'Ivoire)

Il existe bien entendu des exceptions dans les sols à allophanes ou dans des sols ferrallitiques qui contiennent un mélange illite — kaolinite — montmorillonite.

C'est généralement la matière organique qui introduit un supplément de capacité d'échange de l'ordre de 3 mé pour environ 1 % de matière organique dans le sol. La remontée biologique et la capacité d'échange de la matière organique, fait en sorte que dans les régions humides il y a une proportionnalité entre teneurs en bases et teneurs en matières organiques dans l'horizon supérieur des sols. Les graphiques joints (fig. 3 et 4) représentent la relation entre la somme des cations échangeables et le taux d'azote total (proportionnel à la matière organique) dans des sols ferrallitiques de la zone 1300-1500 mm de pluies en Côte d'Ivoire Forestière (les sols les plus riches se trouvent sur roches basiques) (DABIN, 1970).

Même lorsque les roches sont profondément altérées et les cations fortement lessivés, l'influence de la roche-mère en zone tropicale humide se manifeste jusqu'en surface sur la teneur en argile des sols (éléments $< 2 \mu$), les roches basiques fournissant généralement des sols plus argileux qui fixent mieux la matière organique que les sols sableux.

(d) Action du défrichement

Le défrichement par brulis peut amener au sol une quantité de cendres de l'ordre de 1 à plusieurs tonnes par ha en forêt, et plusieurs centaines de Kg sous savane arbustive.

Le relèvement du pH en surface peut être de l'ordre de 2 unités (4,5 à 6,5), le pourcentage de calcium augmente par rapport aux autres cations il a même été signalé certains cas de pH alcalins (R. MOREAU) (du fait peut-être de la présence de carbonates). Ce relèvement du pH et de la richesse en bases (augmentation de 3 à 6 fois en magnésium et calcium) peut avoir une action très bénéfique sur la réussite des cultures, mais cette amélioration risque d'être éphémère si elle n'est pas entretenue, et surtout si le sol est soumis au ruissellement et à l'érosion.

PERTE D'ÉLÉMENTS APRÈS LE DÉFRICHEMENT

Si le sol défriché n'est pas fortement protégé, la perte d'éléments par lixiviation ou ruissellement latéral, peut être de 50 % dès la première année surtout pour le calcium et le potassium ; l'effet bénéfique d'un brulis peut être annulé en 2 ou 3 ans (exemples du Zaïre ou de la Côte d'Ivoire). Les quantités perdues annuellement après brulis sont estimées à 500 ou 600 kg de Cao par ha sur 0-25 cm.

(e) Pertes progressives au cours de la culture

Indépendamment de la lixiviation directe des cendres, il se produit un appauvrissement régulier du sol avec la culture, de nombreuses expérimentations ont été faites dans différentes régions, en particulier en Casamance (sud du Sénégal), dans une région à climat alterné sur sol ferrallitique, l'évolution de la somme des bases échangeables est la suivante : forêt : 6,8 mé, 3 ans de culture : 4,2 mé, 12 ans : 3,2 mé, 40 ans : 2 mé (SIBAN, 1972).

Toujours en Casamance R. FAUCK en 1956 signale une baisse du pH de 0,15 à 0,20 unités par an après défrichement ; en six ans le pH est passé de 6,4 à 5, pendant ce temps le calcium échangeable est passé de 2,7 mé à moins de 1 mé p. 100 g ; avec un apport de 2 tonnes de Cao à l'hectare ou une tonne de phosphate naturel tricalcique, le taux de calcium et le pH sont revenus à leur valeur d'origine. Il faut environ 3 ans pour obtenir un effet significatif du phosphate naturel.

EXEMPLES DE PERTES DE Ca ET Mg PAR EXPORTATION DES CULTURES ET LIXIVIATION

Dans des essais de cases lysimétriques au Sénégal, pluviométrie 600 à 800 mm (TOURTE 1964), les pertes annuelles en Cao Kg ha sous arachide sont d'environ 40 kg par lixiviation et 100 Kg par exportation.

Les pertes en MgO Kg ha sont de 10 Kg : lixiviation et 40 Kg : exportation. L'apport d'amendement calco magnésien et de sulfate d'ammoniaque peut doubler les pertes par lixiviation.

Dans la vallée du Niari au Congo avec 1200 mm de pluie les pertes de CaO par lixiviation sont de 250 Kg ha sous arachide.

Dans des essais de plantes fourragères en Côte d'Ivoire (ROOSE et TALINEAU 1973) (1700 mm de pluie) les pertes par exportation et lixiviation sont proportionnelles aux quantités d'engrais calco magnésien apportées ; nous donnons ici les valeurs annuelles pour des apports moyens de fertilisants : — sous stylosanthes guyanensis avec un apport de 40 Kg de Mg, l'exportation est de 60 Kg et la lixiviation de 20 Kg, le déficit à l'hectare est de 40 Kg Mg.

Sous le même fourrage, avec un apport de 150 Kg de Ca, l'exportation est de 200 Kg et la lixiviation de 150 Kg, le déficit annuel est de 200 Kg Ca (280 Kg CaO).

Il apparaît donc que les amendements calco magnésiens sont peu rentables, même sous culture fourragère.

Sous plantations pérennes de cacaoyers en Nigeria (WESSEL 1967), durant 30 années de culture, le taux de calcium échangeable s'est abaissé de 15 mé à 7,8 mé et le taux de magnésium de 2,3 mé à 1,8 mé.

(f) Les pertes par érosion

Les pertes d'éléments par érosion, indépendamment de l'exportation et de la lixiviation, sont mesurées par l'analyse des produits recueillis dans les cuves de mesure de l'érosion.

Les pertes sont proportionnelles aux quantités de terre enlevées. Elles sont généralement très faibles sous végétation naturelle (forêt ou savane), une centaine de Kg de terre et 2 ou 3 Kg CaO et MgO ha et par an. Sur une pente de 7 % en Côte d'Ivoire forestière, ROOSE (1975) signale des pertes de 30 T de terre par ha et par an sous culture et plus de 100 tonnes terre ha an sous sol nu, correspondant respectivement à 57 Kg et 140 Kg de CaO et 35 à 75 Kg de MgO.

L'érosion a pour effet de décaper la partie supérieure du sol la plus riche et d'amener en surface des couches sous jacentes plus pauvres ; il y a aussi un effet de tassement et de destruction de la structure du sol, les pertes de matières organiques sont considérables, près de 5 tonnes par ha et par an en sol nu (2.725 Kg carbone).

2. CONSÉQUENCES DE L'ACIDIFICATION

On peut multiplier les exemples précédents, les valeurs étant différentes suivant la richesse du sol au départ, mais dans certains cas particulier la perte en Ca et Mg et la baisse du pH s'accompagne de l'apparition d'éléments toxiques comme le manganèse ou l'aluminium.

Nous donnons un exemple concernant le manganèse dans la vallée du Niari au Congo, le problème de l'aluminium étant beaucoup plus général.

Sols ferrallitiques argileux (vallée du Niari) (G. MARTIN, 1970).

	<i>Sol sous-savane</i>	<i>Défriché après 3 ans</i>
pH	5	4,7
(Ca	1,7	0,89
)		
Bases (Mg	0,2	0,04
)		
éch. (K	0,22	0,13
)		
mé (na	0,03	0,03
Mn éch. ppm	7,5	15

— La teneur en Mn dans la feuille du cotonier passe de 500 ppm en sol fertile à 1 400 ppm dans le sol appauvri.

PROBLÈME DE L'ALUMINIUM ÉCHANGEABLE

Comme nous l'avons déjà montré dans un graphique précédent, il a été trouvé dans de nombreux sols Africains, Congo, Côte d'Ivoire, Guinée, etc, une évolution de l'Al échangeable extrait au KCl, qui passe généralement de 0,5 mé p. 100 g dans des sols à pH = 5,5 à 2 mé dans des sols à pH : 4,5, la somme des cations échangeables en sens inverse varie de 2 ou 3 mé à pH = 5,5 à moins de 0,5 m à pH = 4,5. KAMPRATH définit un rapport ($\frac{Al}{Al + S}$) qui condi-

tionne l'action de Al échangeable sur les végétaux. S = Somme des cations basiques en mé.

Au-delà de 60 % toutes les plantes sont sensibles, mais certains végétaux, en particulier les légumineuses sont affectées par un rapport supérieur à 30 %.

La plupart des sols présentant ces caractéristiques sont des sols à kaolinite dominante, mais dans d'autres régions, en Amérique Latine ou en Asie, on rencontre des sols beaucoup plus riches en Al échangeable.

Par EXEMPLE : *En Amazonie Péruvienne* (Echantillons SOURDAT)

	<i>Surf.</i>	<i>Prof.</i>	<i>Surf.</i>	<i>Profondeur</i>		
Argile %	34,5	27	45	55	67	61
pH eau	5,2	5,3	5,5	4,9	4,8	4,8
KCl	4	3,9	4,8	4,1	4,1	4,2
S bases mé	4,64	7,35	10,6	2,32	1,59	0,7
CEC mé	19,8		21	13	13,5	12
Al éch. mé	11,47	16,4	0,58	3,6	4,1	4,7
Mat. org. %	0,7	0,5	8	2	1,6	
Al/Al + S %	71	69	5,18	60,8	72	87

— *En Martinique* (KOUAME - YAO)

	<i>Surf.</i>		<i>Profondeur</i>	
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	
pH eau	4,7	4,8	4,8	
pH KCl	3,7	3,7	3,6	
S bases mé	26,3	47,7	54,01	
CEC mé	39	62	70	
Al éch. mé	5,13	9	15,2	
Mat. org. %	3	1,4	0,8	
Al/Al + S %	16,3	15,8	22,02	

Ces sols riches en Al échangeable et argileux possèdent des types d'argiles différents de la kaolinite, en particulier des minéraux intermédiaires entre la smectite alumineuse et la kaolinite mal cristallisée avec perte d'Al dans les feuillets.

Le rapport de KAMPRATH est souvent très élevé en Amazonie Péruvienne, il demeure assez faible en Martinique en raison de la richesse très élevée en cations échangeables. La teneur en matière organique semble jouer un rôle limitant de la valeur de Al échangeable, mais cela dépend de la nature de l'humus, car les acides fulviques libres, les plus mobiles, augmentent au contraire la teneur en Al échangeable. Dans les sols riches en Al échangeable, l'action sur les plantes est assez générale même pour un rapport $\frac{Al}{Al + S}$ peu élevé.

Dans les sols de Martinique, KOUAME Yao (1982) constate que le chou, l'arachide et la laitue, accumulent de très fortes quantités d'aluminium dans des feuilles malades, et ont beaucoup moins d'aluminium dans les feuilles saines. Le maïs, le gombo, la patate sont peu affectés par l'aluminium et dosent beaucoup moins de cet élément dans leurs feuilles, par contre la plupart des plantes accumulent Al dans leurs racines.

Le chaulage fait disparaître l'Al de l'horizon de surface, mais n'agit pas sur les couches profondes, les racines sont riches en Al quel que soit le traitement.

3. BILAN GLOBAL DE L'APPAUVRISSMENT DU SOL

Dans l'étude de l'évolution des sols sous culture, il n'est pas possible de dissocier le lessivage et la perte de cations par érosion, de la perte simultanée d'argile et de matière organique due à l'action de l'eau de ruissellement.

Nous donnons quelques exemples d'analyse sur des parcelles soumises à l'érosion en Côte d'Ivoire forestière et en zone de savane.

Dans les deux cas, sous sol nu ou sous culture mal protégée le taux de matière organique peut diminuer de moitié en quelques années, cependant la perte de cations varie plus rapidement que les taux de carbone et d'azote total (Tabl. I, II, III).

Un exemple très spectaculaire provient des Terres de Barre du Sud du Togo (DEKADJEVI), où par rapport à un témoin totalement protégé (Forêt Sacrée) une culture de maïs continue donne un sol dix fois plus pauvre en azote total et en somme des bases échangeables (Tabl. IV), par contre sous canne à sucre avec engrais minéraux au Congo, il y a acidification et perte de bases, sans perte parallèle d'azote total (Tabl. V).

Des mesures de structures du sol (taux d'agrégats stables, indice Is de HENIN, indice global de structure) montrent une

dégradation assez générale de la structure du sol sous l'influence de la culture et de l'érosion, cette dégradation de structure est liée à la perte de matière organique (au Togo : Is de

HENIN passe de 0,09 à 1,74, pour une variation d'N total de 4,8 % à 0,4 %), les corrélations ne sont pas toujours simples car la richesse en argile intervient également, de même la

TABLEAU I

Evolution de la matière organique sous culture dans les sols ferrallitiques très désaturés (sols sur sables tertiaires de Basse Côte d'Ivoire). Prof.0-15 cm

		3 années d'expérience					Indice de structure
		Terre érodée Kg/ha	M O %	N %	C/N	S mg/100 g	
Témoin	Forêt	2 800	2,85	0,151	11	1,4	1 350
Culture	2 ans plante de couverture 1 an maïs	77 540	2,5	0,099	14,8	0,3	1 100
Sol nu	3 ans	335 391	1,24	0,059	12,4	0,14	700

TABLEAU II

Culture industrielle d'ananas (ONO — Côte d'Ivoire) (0-15 cm)

	M O %	N %	C/N	S mg/100 g	Indice de structure
1 an de culture	1,5	0,069	12,6	3,13	910
4 ans de culture	1,21	0,044	15,9	0,828	900
6 ans de culture	1,21	0,04	17	0,634	840
Régénération 4 ans Pennisetum purpureum .	2,46	0,08	17,7	2,48	1 350

TABLEAU III

Chiffres obtenus à la station I.R.C.T. de Bouake (Côte d'Ivoire) sur sol ferrugineux tropical lessivé à 25 % (A + L) sur 0-20 cm

	Culture de Coton			Sommet des bases échangeables	
	C %	N %	P ₂ O ₅ %	pH	S mg/100 g
Sols sous culture récente non améliorés (coton 1 500 kg/ha)	0,895	0,083	0,44	6,3	6,46
Sols améliorés par 20 années de fumier de ferme (coton 3 000 kg/ha)	1,167	0,077	1,83	6,5	9,17
	1,17	0,11	2,11	6,8	12,85
Sols érodés (rendements en coton médiocres)	0,489	0,052	0,32	6,1	2,43

TABLEAU IV

Parcelles de longue durée (Adiopodoumé) — Sols ferrallitiques fortement désaturés. (0-15 cm)

	Cations échangeables mg						P ₂ O ₅ % total	P ₂ O ₅ % ass.	Fe ₂ O ₃ libre
	pH	N %	S mg	Ca	Mg	K			
Forêt	4,4	1,26	1,72	1,50	0,12	0,07	0,549	0,050	1,5
Culture de maïs continu	4,8	0,426	0,31	0,05	0,18	0,03	0,549	0,045	1
Pueraria (5 ans)	5,7	1,43	4,11	2,90	1,01	0,16	0,801	0,125	1,4

TABLEAU V
Congo — Sol du Niari — Sols ferrallitiques moyennement désaturés. (0-15 cm)

Is	Cations échangeables mē						P ₂ O ₅ % total	P ₂ O ₅ % ass.	Fe ₂ O ₃ libre
	pH	N %	S	Ca	Mg	K			
Jachère	5,5	1	2,97	1,5	0,51	0,25	0,847	0,075	6,4
Maïs récent	5	1	1,97	1,5	0,21	0,25	0,916	0,110	3,2
Canne à sucre 14 ans avec engrais	4,2	1,04	0,48	0,05	0,06	0,36	1,830	0,130	6,5
Canne à sucre 14 ans avec mulch..	4,6	1,62	1,18	0,63	0,27	0,27	1,240	0,030	7,3

TABLEAU VI
Togo (terres de barre) — Sols ferrallitiques faiblement désaturés. D'après DEKADJEVI. (0-20 cm)

Is	Cations échangeables mē						P ₂ O ₅ % total	P ₂ O ₅ % ass.	Fe ₂ O ₃ libre	
	pH	N %	S	Ca	Mg	K				
Forêt sacrée	0,09	6,9	4,83	18,8	14,4	3,8	0,98	1,030	0,110	2
Jachère	0,41	6,6	1,2	8,25	4,39	1,8	0,12	0,485	0,065	1,5
Palmeraie continue	0,71	5,8	0,43	2,70	1,31	1,32	0,05	0,251	0,020	0,5
Culture de maïs continue.	1,74	4,2	0,4	1,57	0,83	0,67	0,05	0,309	0,070	1,3

TABLEAU VII
Sols de régions sèches — Sols irrigués (Banfora) — Culture de canne à sucre (4 ans). D'après SOURABIE. (0-20 cm)

Is		Cations échangeables mē						P ₂ O ₅ % total	P ₂ O ₅ % ass.	Fe ₂ O ₃ libre	
		pH	N %	S mē	Ca	Mg	K				
Sol peu évolué	Jachère	0,6	5,80	0,31	2,33	0,90	1,35	0,07	0,350	0,010	1,25
	cultivé ..	1,10	6,5	0,32	5,68	4,05	1,5	0,06	0,270	0,020	2,1
Sol ferrugin. tropical	Jachère	0,8	6,5	0,63	3,79	2,10	0,75	0,32	0,180	0,005	0,45
	cultivé ..	0,90	5,5	0,22	0,97	0,45	0,45	0,06	0,180	0,010	0,7
Sol hydromorphe	Jachère	0,8	4,9	1,54	0,95	0,45	0,3	0,17	0,620	0,040	2,95
	cultivé ..	1,5	5,2	0,64	1,55	1,05	0,3	0,18	0,440	0,060	2,6

TABLEAU VIII
Sols de régions sèches — Sols non irrigués (Fada'N'Gourma) — Culture de mil (4 ans). D'après PALLO. (0-20 cm)

Is		Cations échangeables mē						P ₂ O ₅ % total	P ₂ O ₅ % ass.	Fe ₂ O ₃ libre	
		pH	N %	S mē	Ca	Mg	K				
Sol ferrugineux tropical sans gravillons	Jachère ...	1,3	6,3	0,33	2,4	1,8	0,45	0,02	0,250	0,070	0,8
	cultivé .	1,1	6,1	0,11	1,4	0,8	0,5	0,05	0,110	0,040	0,5
Sol ferrugineux tropical à gravillons	Jachère ...	1,6	6,2	0,5	4,6	3,0	1,5	0,08	0,200	0,020	1,5
	cultivé .	2,2	6,3	0,5	5	2,2	2,2	0,04	0,200	0,010	4,9
Sol hydromorphe	Jachère...	0,7	6,2	1	17,6	13,5	3,7	0,3	0,470	0,040	3,5
	cultivé .	1,7	5,9	0,9	21,4	15,7	5,3	0,3	0,430	0,020	2,8

forme de l'humus ; en particulier il y a une corrélation positive sous culture fourragère en Côte d'Ivoire entre le taux d'agrégats stables et le taux d'humine ou d'acides humiques gris à grosse molécule (extraits soude) ; inversement la corrélation est négative avec le taux d'acides fulviques libres ou de l'extrait pyrophosphate.

Les corrélations de rang de SPEARMAN montrent le même type de relation positive entre les cations basiques Ca et Mg et l'humine en pourcentage relatif, l'augmentation de ces valeurs s'accompagne d'un enrichissement en carbone total.

A l'inverse de l'appauvrissement par les cultures, des jachères continues amènent un enrichissement très net en matière organique et cations échangeables, avec relèvement du pH ; un exemple caractéristique est celui d'une jachère à Puéraria de 5 ans sur sol ferrallitique de Côte d'Ivoire, qui donne un pH (5,7), un taux d'azote (1,43 ‰) et une somme de cations (4,1 mé) supérieurs aux taux d'origine sous forêt : pH (4,4), N ‰ (1,26), S mé (1,72), et très supérieur à la culture continue de maïs (pH = 4,8, N ‰ 0,42, S mé 0,31) (Tabl. IV) (DABIN, 1982).

— Toujours en Côte d'Ivoire Forestière une jachère continue de Pennisetum Purpureum pendant quatre ans redonne pratiquement le taux de matière organique et de cations de la première année de culture, alors qu'après six années d'ananas le taux d'azote a diminué d'environ deux fois et la somme des bases de 5 fois (Tabl. I, II) (DABIN, 1970).

— En région de savane à Bouaké (1200 mm de pluie) un assolement sur coton comprenant deux années sur trois de Puéraria et 20 tonnes de fumier à l'ha accroît en vingt ans le pH de 6,3 à 6,8 et double le taux de bases par rapport à la première année de culture (6,5 mé, 12,8 mé) (Tabl. III).

Dans les régions plus sèches de Haute-Volta (Banfora), sous culture irriguée de canne à sucre pendant quatre ans il y a baisse de pH (6,5 - 5,5), perte d'azote (0,63 - 0,22) et perte de bases (3,79 - 0,97). Ceci dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés, par contre dans les sols peu évolués (qui sont des sols limoneux de colluvionnement) il y a enrichissement par la culture : pH 5,8 - 6,5, N ‰ 0,31 - 0,32, S mé 2,33 - 5,68 (SOURABIE, 1979) (Tabl. VII).

Cette différence entre les sols ferrugineux tropicaux lessivés et les sols limoneux peu évolués, se retrouve en Haute-Volta dans la forêt classée de Gonse ou un boisement d'Eucalyptus Camaldulensis, provoque un appauvrissement en M.O. et une acidification dans les sols ferrugineux, et au contraire un enrichissement en matière organique et en bases dans le sol peu évolué (THIOMBIANO, 1984). De même ZOMBRE (1984) dans le centre sud de la Haute-Volta à Garango montre que la richesse du sol en limon fin est corrélée avec la teneur en humine héritée et en acides humiques gris de condensation (extrait soude).

Dans les régions plus sèches (Fada N'Gourma) la culture n'abaisse que peu le pH par rapport à la jachère (6,3 - 6,1), on note cependant une perte de Ca⁺ d'environ 1 mé

(PALLO, 1982) (Tabl. VIII) ; l'évolution joue sur les formes de la matière organique, avec perte d'humus évolué (AHS) et augmentation relative de matière organique grossière (M.L.)

Dans les régions humides c'est la très grande rapidité de transformation de la matière organique qui est une cause d'appauvrissement (surtout lorsque la source de carbone est tarie), en région sèche c'est plutôt le retard à l'humification des débris végétaux qui stoppe l'enrichissement du sol (Il faudrait pouvoir accroître par irrigation la période où le sol est humide, car c'est sa dessiccation rapide qui arrête l'activité biologique) (Fig. 5).

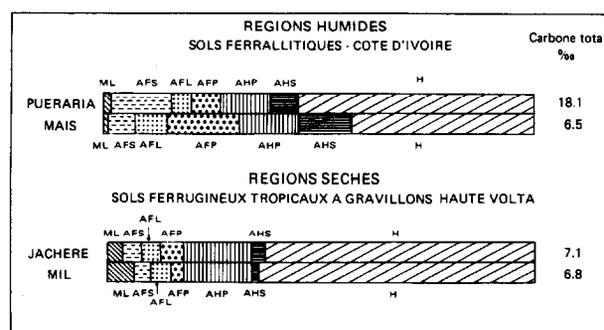


Fig. 5. — Evolution relative des formes de l'humus en régions humides et sèches.

Matières organiques en % de carbone total :
 ML, matières légères ; AFS, acides fulviques soude ;
 AFL, acides fulviques libres ; AFP, acides fulviques pyrophosphate ;
 AHP, acides humiques pyrophosphate ;
 AHS, acides humiques soude ; H, humine

4. EVOLUTION DES SOLS DANS LES TOPOSÉQUENCES

Dans un paysage, l'évolution d'un sol par érosion ou lessivage latéral est liée à la topographie, surtout après disparition de la végétation naturelle, ou même sous couvert végétal, lorsque le processus de dégradation a commencé.

Dans les régions de savane nous avons vu précédemment que l'acidification et la perte de matière organique était plus importante dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés qui occupent généralement la partie supérieure des versants que dans certains sols situés en aval (sols peu évolués limoneux) ; cette différence est liée à la texture et au régime hydrique des sols.

En zone forestière, l'appauvrissement par érosion est fonction de la pente et du couvert végétal, mais il peut se produire également le long des versants une sorte d'érosion chimique du fait de la circulation latérale de l'eau dans les horizons superficiels ; cette circulation latérale peut être plus ou moins accentuée suivant l'état structural des volumes pédologiques, nous donnons un exemple provenant de bassins

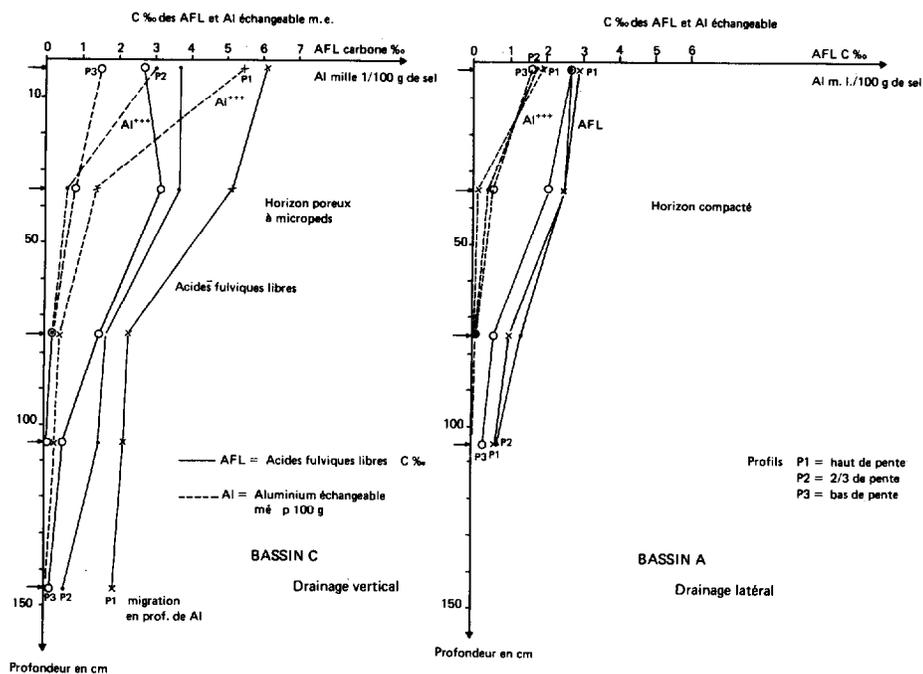


Fig. 6. — Variations de l'aluminium échangeable et des acides fulviques libres en fonction de la profondeur dans deux toposéquences de Guyane. D'après PINDARD (1979)

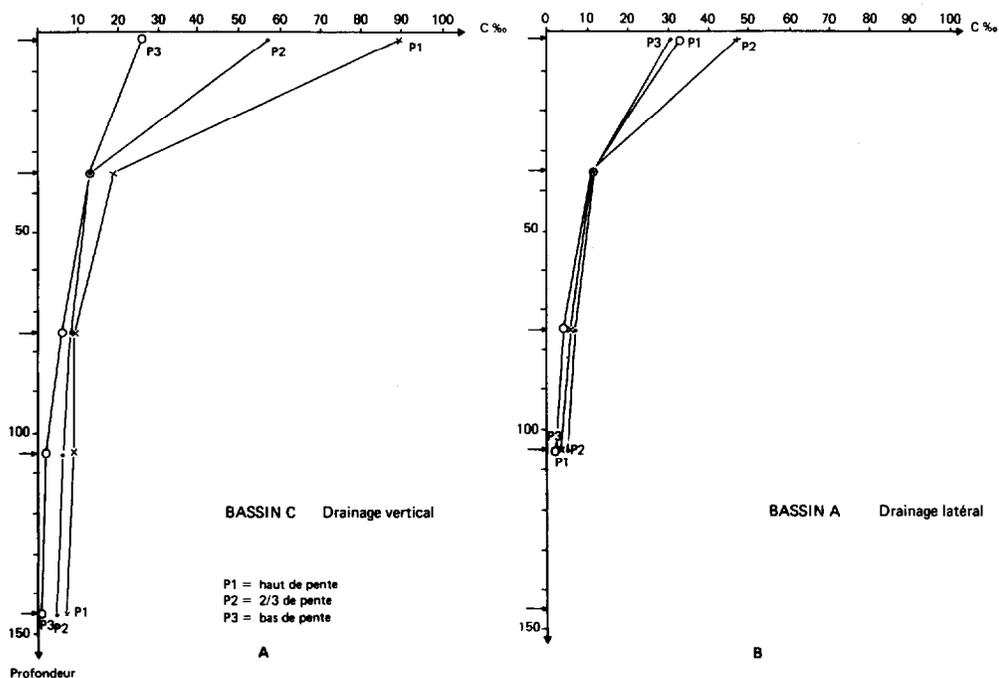


Fig.7. — Evolution du taux de carbone total en fonction de la profondeur dans deux toposéquences en Guyane. (A et B)

versants en Guyane : l'un le bassin C présente une couverture pédologique où la structure est bien conservée et où le drainage est à dominance verticale, l'autre le bassin A présente au contraire un drainage latéral dominant (PINDARD, 1979).

Dans chaque toposéquence sont présentés trois profils, en haut de pente, 2/3 de pente et bas de pente (Fig. 6,7).

Dans le bassin à drainage vertical le sol de haut de pente est considéré comme une couverture initiale avec une couche supérieure très argileuse (55 % argile) recouverte d'un horizon humifère (9 % de C), et montrant une structure très poreuse dite à « micropeds » ; les sols de pente et bas de pente sont moins argileux et moins humifères du fait d'un début de lessivage latéral.

Dans le bassin à drainage latéral dominant, le phénomène d'appauvrissement s'accroît au point que le sol de haut de pente P1 est plus pauvre en carbone que le sol aux 2/3 de pente P2, et la texture de la couche supérieure devient uniformément sablo-argileuse (20 % argile) ; à partir de 40 cm de profondeur on observe une couche compactée qui diminue le drainage vertical, accentue le drainage latéral et provoque des phénomènes d'hydromorphie superficielle.

Dans ce climat à très forte pluviométrie, la décomposition de la matière organique est très rapide, et les acides fulviques représentent de 30 à 50 % de la matière organique totale, une grande partie de ces acides fulviques sont mobiles, et sont nommés acides fulviques libres. Ces acides fulviques libres jouent un rôle dans l'acidification du sol, et les graphiques joints montrent le parallélisme entre les acides fulviques libres et l'aluminium échangeable ; le sol de haut de pente P1 du bassin C, représentant la couverture initiale est le plus riche en Al échangeable (environ 6 mé correspondant à 6 ‰ de C des acides fulviques libres), la pénétration en profondeur des acides fulviques libres et de l'aluminium échangeable est maximum dans le sol à drainage vertical dominant P1.

Dans le bassin A à drainage latéral la pénétration en profondeur est plus faible, l'évolution latérale de Al échangeable est parallèle à l'évolution latérale des acides fulviques libres.

Du point de vue strict de l'acidification, la perte de drainage entraîne donc plutôt une diminution de Al, mais il y a d'autres inconvénients pour la fertilité des sols du fait de la mauvaise structure à faible profondeur.

Le sol bien drainé de haut de pente a sans doute la meilleure potentialité générale, mais une correction par le chaulage est certainement indispensable pour les cultures. D'après BUOL et NICHOLAIDES, le besoin en CaO en mé correspond à deux fois la teneur en Al⁺⁺ échangeable en milliéquivalents (KAMPRATH).

CONCLUSION

Il est impossible dans une courte note de traiter un problème aussi vaste que celui des sols tropicaux acides, on peut seulement rappeler quelques données essentielles et orienter les recherches à venir.

L'acidité qui se mesure par la valeur du pH du sol, n'est pas généralement un facteur direct de croissance pour de nombreuses plantes supérieures, alors qu'il l'est toujours pour la microflore ; le pH est plutôt l'indice de nombreuses propriétés qui jouent un rôle, soit dans l'alimentation des végétaux, soit dans la structure physique des sols qui influent pour leur part sur la fertilité.

Nous rappelons brièvement l'importance du pH sur les phénomènes d'évolution de la matière organique, sur le cycle de l'azote (ammonification, nitrification), sur les formes de fixation du phosphore sur le sol, et leur assimilabilité, sur la solubilité ou l'insolubilité de nombreux éléments majeurs ou traces (fer, manganèse, zinc, cuivre, molybdène, bore, etc).

En ce qui concerne le calcium et le magnésium qui sont les deux cations principaux qui conditionnent la valeur du pH au sol, il y a une contradiction apparente entre les besoins alimentaires des plantes qui sont peu élevés, et la nécessité pour le sol de contenir ces éléments en abondance si l'on veut obtenir des récoltes correctes, liées à une activité biologique suffisante et à une structure favorable à l'enracinement.

Cependant les sols tropicaux sont moins exigeants à ce point de vue que les sols tempérés, l'action de l'acidité sur l'activité des micro-organismes est compensée par une température uniformément élevée qui permet d'importants développements microbiens jusqu'à des pH de 4,5 ; en ce qui concerne la structure des sols ferallitiques elle peut être très bonne en milieu acide grâce à l'action conjuguée du fer et de la matière organique, de même le phosphore lié à l'aluminium conserve une bonne labilité à pH nettement acide, alors que le phosphore lié au fer devient très insoluble sauf en milieu réducteur, et que le phosphore lié au calcium est en très faible quantité.

Ces faits joints à une assez bonne accoutumance de nombreuses plantes aux bas pH (néanmoins supérieurs à 4) font que la plupart des grandes cultures tropicales des régions humides se rencontrent dans des sols acides, jugés inacceptables en climat tempéré. Il n'en demeure pas moins que ces cultures bénéficient généralement d'un relèvement du pH, mais il s'agit de bien connaître les limites utiles et économiques de cette correction, dans les pays tropicaux, et éviter d'appliquer les normes des pays tempérés.

Nous avons vu que l'acidification due à la perte de Ca et Mg par lixiviation, érosion, exportation était autant plus grave que la pluviométrie était plus élevée, que les sols étaient plus profondément altérés, que les réserves en minéraux primaires avaient disparu des couches supérieures, et que les argiles étaient constituées principalement de kaolinite, parfois même d'oxydes métalliques.

Il apparaît à l'étude de nombreuses situations différentes qu'il y a des degrés dans cet appauvrissement, en particulier pour le calcium et le magnésium : des valeurs inférieures à 0,2 mé p. 100 g peuvent provoquer de véritables carences alimentaires, et spécialement pour le magnésium dans la mesure où la teneur en potassium est sensiblement équivalente, dans ce cas on peut observer un grave déséquilibre

Mg/K avec carence nette en magnésium, un chaulage ou un engrais potassique sans apport complémentaire de magnésium provoque des dépressions de rendement.

L'enrichissement des sols en cations Ca et Mg pose un problème dans le cas de sols à très faible capacité d'échange, l'apport d'amendements minéraux provoque des pertes par lixiviation proportionnelle aux quantités ajoutées au sol ; il apparaît que la technique la plus efficace consiste à enrichir le sol à la fois en matière organique et en bases par des jachères cultivées, principalement de légumineuses (*pueraria*) ou des graminées (*pennisetum*) ou d'autres espèces, ou bien par des fumiers et composts lorsque c'est possible.

Cet enrichissement par les plantes de couverture est valable lorsque le sol possède encore quelques réserves accessibles dans les minéraux altérables, les silicates, les oxydes ; il convient donc de s'en assurer par quelques analyses d'éléments dits « totaux » par des acides forts.

Outre les problèmes de carence, l'acidité du sol induit des phénomènes de toxicité ou même de déséquilibre physiologique grave ; en provoquant la libération à l'état échangeable ou soluble d'éléments comme le manganèse ou l'aluminium, parfois même le fer en milieu réducteur.

La toxicité manganique est observée dans certains sites particulièrement riches en manganèse (proximité de gisements au Congo ou au Gabon par exemple), mais pour l'aluminium le phénomène est beaucoup plus général.

Tous les sols à pH égal ou inférieur à 5, montrent un accroissement important de la teneur en aluminium échangeable, qui devient rapidement toxique dans la mesure où les teneurs en calcium deviennent au contraire très faibles.

Cependant les teneurs absolues en Al échangeable sont très variables en fonction de la nature même des colloïdes du sol ; il semble que les sols acides, à kaolinite bien cristallisée ne libèrent que des quantités limitées de Al échangeable (2 ou 3 mg p. 100 g), par contre des argiles en voie de dégradation (inter-

médiaire, smectite alumineuse, kaolinite) peuvent libérer des quantités considérables d'Al échangeable.

La matière organique semble jouer des rôles variables vis-à-vis de l'aluminium échangeable. Lorsque l'humification donne naissance à des acides humiques et de l'humine, dans des sols contenant quelques réserves minérales, l'enrichissement en cations est corrélé à l'enrichissement en humus, d'où un effet de blocage de Al échangeable avec relèvement du pH.

En revanche en climat longuement humide et sol à fort drainage, l'humus contient des proportions très élevées d'acides fulviques libres (ou mobiles) ; ils s'ensuit une aggravation du lessivage, et l'aluminium est alors corrélé directement à la teneur en acides fulviques libres, donc au taux de matière organique.

Dans les sols à teneurs élevées en Al échangeable, la nature de la plante intervient prioritairement dans la sensibilité au phénomène de toxicité, la correction ne peut se faire uniquement par l'apport de matière organique ; si le sol ne contient pas de réserves de bases, et est riche en acides fulviques libres l'amendement calcomagnésien devient alors indispensable, mais la quantité à ajouter doit être évaluée sur la base de deux fois la teneur en Al échangeable. Il y a lieu de ne pas limiter cet amendement uniquement à la couche supérieure, car les racines profondes absorbent beaucoup d'aluminium.

Nous constatons que ce problème des sols acides tropicaux demeure fort complexe, et nécessite pour sa solution des études de pédogénèse, de minéralogie, en particulier de nature des argiles, des analyses chimiques de cations et d'aluminium, des études de physiologie végétale, des mesures de bilan de lessivage et d'érosion, en plus de nombreuses données acquises il y a encore de vastes programmes de recherche à entreprendre dans différentes régions affectées par l'acidité.

BIBLIOGRAPHIE

- BOYER (J.), 1978. — Le calcium et le magnésium dans les régions tropicales humides et subhumides. *Initiation Documentation Technique*, n° 35, ORSTOM Paris 1978.
- BUOL (S.W.), NICHOLAIDES (J.J.), 1979. — Constraints to soil fertility evaluation and extrapolation of research results. Conférence I.R.R.I. Los Banos Philippines, juin 1979.
- DABIN (B.), 1982. — Relação entre a evolução dos compartimentos húmicos sob cultura e os fatores físicos e químicos da fertilidade em diferentes solos tropicais. Coloquio Regional Sobre Materia Organica Do Solo. CENA, Piracicaba, Sao Paulo, oct. 1982, 87-96.
- DABIN (B.), 1970. — Pédologie et développement, p.165-237 (Les Facteurs de la Fertilité des Sols) — *Techniques rurales en Afrique*, n° 10, BDPA — ORSTOM.
- DEKADJEVI (A.), 1974. — Contribution à l'étude de la dégradation des propriétés physico-chimiques et chimiques des Terres de Barre sous culture au Togo. Thèse Paris VI, 1974, 212 p.
- FAUCK (R.), 1956. — L'évolution du sol sous culture mécanisée, le problème du pH et sa correction. VI Congrès International de la Science du Sol. Paris 1956, Commissions IV et VI.
- KAMPRATH (E.J.), 1970. — Exchangeable Aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 252-257.
- KAMPRATH (E.J.), 1979. — Soil Acidity in well drained soils of the tropics as a constraint of food production. Conférence IRRRI, Los Banos, Philippines, juin 1979.
- KOUAME YAO, 1982. — Etude des sols rouges montmorillonitiques acides de la Martinique. Thèse Paris VII, 1982, 193 p.
- MARTIN (G.), 1970. — Synthèse agropédologique des études ORSTOM dans la vallée du Niari en République du Congo Brazzaville. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol. vol. VIII, n° 1*, 1970.
- PALLO (F.), 1982. — Comparaison des caractères physicochimiques et de la matière organique de trois pédon cultivés et vierges entre Fada N'Gourma et Piega (Haute Volta). Thèse Univ. St. Jérôme Aix Marseille 1982, 180 p.
- PINDARD (M.), 1979. — Evolution de la matière organique dans deux toposéquences guyanaises à dynamique de l'eau différentes. Mémoire quatrième année I.S.T.O.M. (Le Havre), 57 p. *multigr.* (ISTOM et SSC Bondy).
- ROOSE (E.), 1975. — Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest, vingt années de mesures et petites parcelles expérimentales. *multigr.*, ORSTOM, Adiopodoumé, Côte d'Ivoire.
- ROOSE (E.) et TALINEAU (J.C.), 1973. — Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur sol sableux de basse Côte d'Ivoire. C.R. 10^e Coll. Inst. Intern. Potasse (Abidjan), 305-320.
- SIBAN (P.), 1972. — Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en haute Casamance. Principaux résultats. *Agron. Trop.* 27,5 : 574-591.
- SOURABIE Noumbié, 1979. — Influence de la culture de la canne à sucre sur les sols de Béréga Dougou (Haute Volta). Thèse Univ. St. Jérôme, Aix Marseille, 1979, 200 p.
- THIOMBIANO (L.), 1984. — Première approche de l'influence du reboisement en Eucalyptus camaldulensis sur des sols de Gonsé (Haute Volta). Thèse Marseille (St. Jérôme) 142 p.
- TURENNE (J.F.), 1979. — Mode d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences Guyanaises. Thèse — *Mém. ORSTOM* n° 84.
- TOURTE (R.), VIDAL (P.), JACQUINOT (L.), FAUCHE (J.), NICOU (R.), 1964. — Bilan d'une rotation quadriennale sur sol de régénération au Sénégal. *Agron. Trop.* XIX, 12 : 1033-1072.
- WESSEL (M.), 1967. — Cacao Soils of Nigeria. Segunda Conferencia Internacional de Pesquisas em Cacao (Bahia Brésil). Nov. 1967, 417-429.
- ZOMBRE (P.N.), 1984. — Les sols développés sur roches à complexe d'altération montmorillonitique et kaolinitique dans le centre sud de la Haute Volta. Thèse Univ. St. Jérôme, Aix Marseille, 350 p.