



Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération



PROPRIÉTÉS D'ÉCHANGE IONIQUE
DES SOLS FERRALLITIQUES ARGILEUX
DE LA VALLÉE DU NIARI
ET SABLEUX DU PLATEAU DE MBE-BATEKE
AU CONGO

APPLICATION À LA CORRECTION DE LEUR ACIDITÉ

Mathurin-Yves DJONDO

Mathurin-Yves DJONDO

PROPRIÉTÉS D'ÉCHANGE IONIQUE
DES SOLS FERRALLITIQUES ARGILEUX DE LA VALLÉE DU NIARI
ET SABLEUX DU PLATEAU DE MBE-BATEKE AU CONGO
APPLICATION À LA CORRECTION DE LEUR ACIDITÉ



18 JUIN 1996

φ68
PEDAPP
DJO

Montpellier
1995

H200076904
2 ex FDI
Non Num



F

RESUME

L'étude de l'acidité des sols et de sa correction a porté sur les sols ferrallitiques de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké au Congo. Les observations ont été réalisées respectivement à Mantsoumba sur un site sous culture mécanisée de manioc depuis 15 ans et au PK 45, après trois ans de culture à base de manioc.

Après la présentation des sols acides d'intérêt agricole dans leur contexte naturel, ce travail a procédé à une première évaluation des pratiques utilisées dans la correction de l'acidité, notamment le recours au calcaire broyé de Madingou. Grâce à des observations et prélèvements d'échantillons de sol dans des situations culturales contrastées, il a été établi un constat de dégradation des propriétés physico-chimiques des sols sous culture.

Des études plus fines ont été mises en oeuvre, concernant la nature et la réactivité du complexe d'échange. Les constituants minéraux des sols ont été caractérisés ainsi que leur réactivité, en privilégiant la prévision de leur comportement global lors de l'acidification du sol ou la correction de l'acidité.

Une incubation pendant 3 mois en conditions contrôlées de laboratoire a permis de mieux apprécier les effets des apports de calcaire et de Pueraria sur la réaction et le complexe d'échange des sols. Les modifications de la dynamique d'échange à l'interface sol-solution ont été étudiées par des simulations de la lixiviation sous pluviométrie locale et par la technique de l'électrodialyse. Ces différents tests ou méthodes ont été validées par la mesure de l'absorption des éléments minéraux par une plante-test, le *ray grass* d'Italie cultivé sous serre, en vases de végétation.

Des propositions ont ainsi été faites concernant les approches méthodologiques, la connaissance du fonctionnement des sols étudiés et les perspectives pour des travaux futurs.

Mots - clés : capacité d'échange, CEC, CEA, charges variables, sols acides, amendement calcaire, lixiviation, matière organique, électrodialyse, Vallée du Niari, Mbé-Batéké plateau, Congo.

SUMMARY

Investigations on soil acidification and its correction by liming was undergone in Vallée du Niari and Mbe-Bateke plateau in Congo. Sampling sites were a 15 - year high mechanized and a 3 - year crop production based on cassava, respectively.

After studying the soil acidification and the liming effects in the field, subsequent modifications were investigated using classical chemical methods and studied in purchase of variable charge.

A 3 - month incubation was conducted under laboratory controlled conditions, in order to better assess the effects of lime application and organic matter inputs on some physico-chemical characteristics of the soils, especially on exchange complex reactivity.

A second incubation experiment was conducted during 3 weeks under the same conditions and the soil samples in Büchner-type funnels were leached weekly to simulate losses of ions under rainfall conditions.

The nutrient availability as influenced by liming and organic matter was also studied by electrodialysis technique as well as the rate of absorption by a test plant grown in a greenhouse pot experiment.

The results of the whole methods are compared and proposals were made concerning the methodological approach used, the contribution to the soil's knowledge, and the future investigations needed.

Key words : CEC, AEC, variable charge, soil acidity, liming, leaching, organic matter inputs, electrodialysis, Vallée du Niari, Mbé-Batéké plateau, Congo.

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué pour sa phase de terrain sur les essais du réseau Sols acides de l'IBSRAM auquel est associé l'ORSTOM dans la Vallée du Niari et du projet AGRISUD sur le plateau de Mbé-Batéké.

La partie expérimentale a été essentiellement menée au Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC) du Centre ORSTOM de Montpellier ; ce travail s'inscrit intégralement dans le programme de l'unité «*Propriétés physiques et physico-chimiques des sols*» qui réalise essentiellement des études de caractérisation des sols, permettant surtout de comprendre ou de prévoir le comportement de ces sols dans différents systèmes de culture. L'accent est mis sur la réactivité des surfaces de la phase solide organo-minérale du sol et sur la dynamique des échanges intervenant entre cette phase solide et la solution du sol.

Je ne saurais jamais assez remercier M. Georges PEDRO qui, en m'autorisant à m'inscrire en thèse, m'a permis d'amorcer ce travail de recherche. Malgré ses multiples occupations, entre autres de Président de l'Académie d'Agriculture de France et de Membre correspondant de l'Académie des Sciences, il a pris sur son temps pour lire ce manuscrit et m'a fait l'honneur d'être rapporteur de cette thèse.

Mme Evelyne GARNIER-ZARLI, Professeur à l'Université Paris XII a pris la suite de la direction de cette thèse et m'a accordé sa confiance. Il m'est agréable de lui témoigner ici ma profonde gratitude et lui adresser mes hommages les plus déférents.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait M. Philippe LOUGUET, Professeur à l'Université PARIS XII pour avoir bien voulu siéger à ce jury de thèse.

M. Roland MOREAU, Directeur de Recherche à l'ORSTOM et Responsable de l'UR 3D m'a accueilli dans son équipe dont je n'ai cessé d'apprécier, chaque jour, l'ambiance de concorde dans le travail. Les longues discussions que nous avons eues, ses conseils prodigués pour le choix des paramètres à étudier ainsi que pour la rédaction m'ont incité à faire l'effort de réflexion nécessaire à la réalisation de ce mémoire. Je lui exprime ici mes plus vifs remerciements pour sa patience et sa compréhension.

Je tiens à remercier M. Jean-François VIZIER, Directeur de Recherche, Responsable du LCSC du Centre ORSTOM de Montpellier qui n'a pas ménagé son temps pour discuter de mes résultats et m'aider à organiser ce document qui porte ainsi les empreintes de sa rigueur d'analyse. Le chapitre 5 lui doit particulièrement beaucoup. En acceptant d'être rapporteur, il témoigne de l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et que je m'efforce de lui rendre.

M. Philippe CAMBIER, Directeur de Recherche à la Station de Science du sol de l'INRA-Versailles, a consacré une partie précieuse de son temps à la lecture du premier manuscrit de

ce travail et m'a reçu à Versailles pour en discuter longuement. De ce fait, il m'a aidé à réaliser à mieux structurer le texte et je le remercie sincèrement d'avoir accepté de juger ce travail.

J'exprime ma vive reconnaissance à M. Guy CATRIX, Chef de la Mission Orientation de FORMAGRO, pour toutes les facilités qu'il m'a accordées et pour l'amitié qu'il a, de tout temps, manifestée à mon égard.

Je n'oublie pas M. Paul DE BOISSEZON, Directeur de Recherche ORSTOM à la retraite qui, pour m'avoir précédé sur mes terres de Makabana, m'a si bien communiqué la volonté de mieux découvrir cette *terra incognita*. J'ai plaisir à remercier MM. Paul FALLAVIER, directeur de l'URA Analyse des sols et des eaux du CIRAD et Marc SCHWARC, qui ont toujours été des interlocuteurs prêts à m'accueillir pour discuter de mes résultats.

De tout le personnel du LCSC, je garde le souvenir indélébile d'avoir découvert des hommes et des femmes particulièrement attachants et avec qui j'ai construit une amitié forte. Je leur exprime ma profonde gratitude, avec toutefois une mention spéciale pour Joël FARDOUX dont la collaboration a été déterminante dans la conduite de *tous* les travaux de laboratoire, Mme Evelyne GAVINELLI, dont l'efficacité souriante et l'aide sont incontournables pour les analyses de CHN, Marie Christine LARRE-LARROUY, pour son aide dans la culture de *ray grass*, Marc VIENNOT, dont j'ai partagé le bureau (à 50% !) durant la dernière phase de ce travail et Jean Albert PETARD qui n'a pas hésité à sacrifier un week end (sacré) pour m'aider à présenter les graphiques de la soutenance.

Je n'oublie pas M. Bernard DENIS, qui alors Chef du Service de Pédologie au Centre ORSTOM de Brazzaville, m'a accordé les moyens nécessaires aux déplacements sur le terrain. J'adresse mes sincères remerciements à M. Antoine MAPANGUI qui, après m'avoir initié à la Pédologie à l'Institut de Développement Rural, guida six ans plus tard mes premiers pas dans la connaissance des sols de la Vallée du Niari. MM. Blaise NYETE et Eric-Gervais TOUTOU-MISSIE, m'ont fait profiter de leurs connaissances et pratiques du terrain de Mantsoumba. Je remercie également M. Jacques ARRIVETS du CIRAD, responsable du Projet FAC Manioc qui m'a permis de «creuser des trous» dans ses essais au champ sur la parcelle 24 du Complexe agro-industriel de Mantsoumba. Je n'oublie pas les responsables d'AGRISUD pour les parcelles du PK 45 sur le plateau de Mbé-Batéké.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu par leur amitié ou leur affection : Philippe FARGEON, Claude et Denis MENOURY, Régine et Manuel RIBEIRO, Ghyslaine et Guy SERIEYS, Marie-Jo TARTAROLI et bien entendu Marie-Josée SAMBALA.

Je ne saurai oublier les nombreuses personnes qui, d'une manière ou d'une autre, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce travail ; qu'elles veuillent bien m'excuser de n'avoir pu les citer dans cette page de remerciements que j'aurai souhaitée plus longue et qu'elles soient assurées de mes amitiés et de ma très vive reconnaissance.

INTRODUCTION

«... notre compréhension de l'échange d'ions dans les sols, où les échangeurs sont des mélanges complexes de minéraux argileux, d'oxydes et de matière organique, n'a pas été menée de pair avec les travaux sur des matériaux plus purs. (...) Il est évident que d'autres avancées ne se produiront pas tant que nous n'aurons pas obtenu ces données sur les sols eux-mêmes.» - G.W. THOMAS (1977).

Les sols acides des régions tropicales constituent une grande réserve de terres à cultiver, susceptible d'apporter une contribution majeure à la résolution du problème de l'alimentation humaine. La gestion de ces sols adaptée à une production continue et durable est donc devenue une préoccupation majeure (SANCHEZ, 1976 ; MOREAU et GODEFROY, 1985 ; PEDRO, 1985 ; PIERI, 1985 ; LATHAM, 1987 ; SANCHEZ et SMYTH, 1987 ; IBSRAM, 1989).

Au Congo, la Vallée du Niari et les Plateaux Batéké ont connu un développement important de la culture mécanisée à partir des années 1940 en raison de leur végétation de savane facile à défricher et de leur topographie relativement plane (SAUTTER, 1966 ; MAUMON et GRIVEAU, 1968).

La mécanisation, considérée comme un puissant moyen de mise en valeur de ces vastes étendues de savanes, conduit cependant à un appauvrissement en matière organique des sols, une dégradation rapide de leur structure, une diminution du pH et du taux de saturation de leur complexe adsorbant (BRUGIERE, 1953 ; MARTIN, 1958, 1961, 1962 et 1963). Ces transformations des sols cultivés, auxquelles s'ajoute dans la Vallée du Niari une augmentation des teneurs en manganèse soluble qui devient toxique pour les plantes cultivées (en particulier arachide et cotonnier), entraînent une diminution rapide des rendements dès la deuxième année de culture (JULIA, 1953 ; OLLAGNER et PREVOT, 1955 ; PREVOT et al, 1955 ; FRANQUIN, 1958 ; MARTIN, 1958).

La culture mécanisée de l'arachide s'est rapidement traduite par un échec sur les sols sableux du plateau de Mbé, et tout l'effort a été reporté sur les sols argileux de la Vallée du Niari, région dont le débouché à l'océan est favorisé par le chemin de fer.

La mise en culture de ces sols soulève d'énormes problèmes et de nombreuses actions ont été menées par différents instituts de recherche dans le Niari (DE BOISSEZON et MARTIN, 1967 ; MAUMON et GRIVEAU, 1968). Des solutions partielles ont été trouvées, mais les mécanismes de cette dégradation restent mal connus (MARTIN, 1970).

Il a donc paru opportun d'approfondir l'analyse du comportement physique, chimique et biologique de ces sols en vue d'une meilleure gestion de leur fertilité afin d'assurer une production agricole durable. Deux axes de recherche complémentaires ont ainsi été menés dans le cadre des projets «IBSRAM/ORSTOM/DGRST-CONGO» et «FAC MANIOC CONGO» dans la Vallée du Niari :

- évolution physique du sol sous culture mécanisée intensive de

manioc (MAPANGUI, 1992),

- acidité du sol et possibilités de sa correction en relation avec ses propriétés d'échange.

L'étude de ce dernier aspect, objet de ce travail, est étendue aux sols sableux du plateau de Mbé, où les mêmes problèmes se posent.

L'acidité de ces sols constitue toujours une contrainte agronomique majeure s'aggravant sous culture, que l'on s'efforce de corriger par des apports de calcaire. Cette correction est envisagée en rapport avec la valorisation des calcaires broyés locaux (JULIA, 1953 ; PREVOT *et al*, 1955 ; MARTIN, 1961), mais les résultats obtenus ne sont pas toujours satisfaisants sans que l'on puisse en donner des raisons précises.

On sait que l'aggravation de l'acidité ou sa correction modifie les équilibres existant entre le sol et sa solution, et partant, l'alimentation minérale des plantes cultivées qui s'effectue principalement à partir d'éléments contenus dans la solution du sol (CALLOT *et al*, 1982 ; MENGUEL *et* KIRKBY, 1982 ; MARSCHNER, 1986).

La régulation de ces phénomènes dépend de propriétés chimiques qui peuvent être appréhendées à partir de la notion de capacité d'échange (PEDRO, 1987). Ces propriétés dépendent de la nature des constituants du sol (argile, oxhydroxydes, matière organique) qui, au Congo comme dans les régions tropicales humides en général, déterminent un complexe d'échange à charges variables suivant le pH, la composition et la concentration de la solution du sol. L'étude de ces propriétés nécessite donc une approche particulière (SANCHEZ, 1976 ; UEHARA *et* GILLMAN, 1981 ; GILLMAN, 1991). La disponibilité des nutriments pour les plantes cultivées peut ainsi être appréciée à partir de l'étude des **constituants et propriétés d'échange** des sols (DELVAUX, 1988).

Ce travail, réalisé en intégrant une approche classique de terrain à des études du complexe d'échange et de la dynamique d'ions conduites sur des modèles expérimentaux en laboratoire, est présenté en six chapitres :

- le premier fait le point sur l'acidité des sols, les problèmes qu'elle pose et la façon dont ces problèmes ont été abordés au Congo, en particulier dans la Vallée du Niari et sur le plateau de Mbé-Batéké ;

- le second constate les modifications des caractéristiques du sol et l'aggravation de l'acidité sous culture, puis procède à une évaluation de la pratique actuelle de l'amendement calcaire au Congo, en se basant sur les expérimentations existant dans les deux zones d'étude ;

- le troisième traite de la caractérisation du complexe adsorbant dans les deux types de sol,

- le quatrième présente les résultats des essais de correction de l'acidité menés en laboratoire,

- le cinquième aborde les tests d'appréciation de la dynamique d'échange à l'interface sol-solution,

- le sixième, enfin, fait la synthèse des résultats, tire les enseignements de ce travail tant du point de vue de la méthodologie utilisée, des acquis scientifiques que des applications agronomiques.

**LES SOLS ACIDES DU CONGO ET LES PROBLEMES QU'ILS
POSENT**

«Toute réalité est unité complexe.» Alfred North WHITEHEAD, logicien et mathématicien britannique (1861-1947).

Les zones planes exondées des plateaux sous savane du sud et du sud-ouest du Congo constituent des régions à vocation naturelle pour l'agriculture mécanisée.

Après un aperçu bibliographique sur l'origine et les incidences agronomiques de l'acidité des sols, les sols acides du Congo sont resitués dans leur cadre naturel, plus particulièrement dans la Vallée du Niari et sur le plateau de Mbé-Batéké.

Un historique des travaux réalisés sur la dégradation des sols et la correction de leur acidité est ensuite présenté.

C'est en fonction des résultats obtenus lors de ces différents travaux et des expérimentations menées actuellement au champ dans les deux régions du Niari et des plateaux Batéké que des situations ont été choisies pour la présente étude.

1.1. L'ACIDITE DES SOLS

La notion d'acidité du sol est celle qui, avant même celle de l'activité des ions en solution, a suscité le plus d'arguments pour alimenter les intenses discussions sur sa signification dans le domaine de la physico-chimie des sols (SPARKS, 1984).

L'acidité du sol est difficile à caractériser simplement (SANCHEZ, 1976 ; GILLMAN, 1991) et les valeurs de pH mesurées de façon très différentes (DOLLING et RITCHIE, 1985 ; RITCHIE, 1989 ; GILLMAN, 1991), ajoutent à la difficulté de cerner une notion qui est une représentation simplifiée d'une réalité complexe (MENGEL et KIRKBY, 1982 ; CHAMAYOU et LEGROS, 1989 ; RITCHIE, 1989).

L'importance de la question suscite toujours beaucoup d'intérêt comme le dénotent de récentes synthèses (ROBSON, 1989 ; BRADY, 1990 ; VAN LIEROP, 1990 ; GILLMAN, 1991 ; ULRICH et SUMNER, 1991).

Il est donc utile de faire un point rapide sur les connaissances actuelles concernant le statut «acide» d'un sol.

1.1.1. DISTRIBUTION ET ORIGINE

L'extension des sols présentant pour la production agricole des contraintes liées à l'acidité est représentée sur la figure 1.1-1.

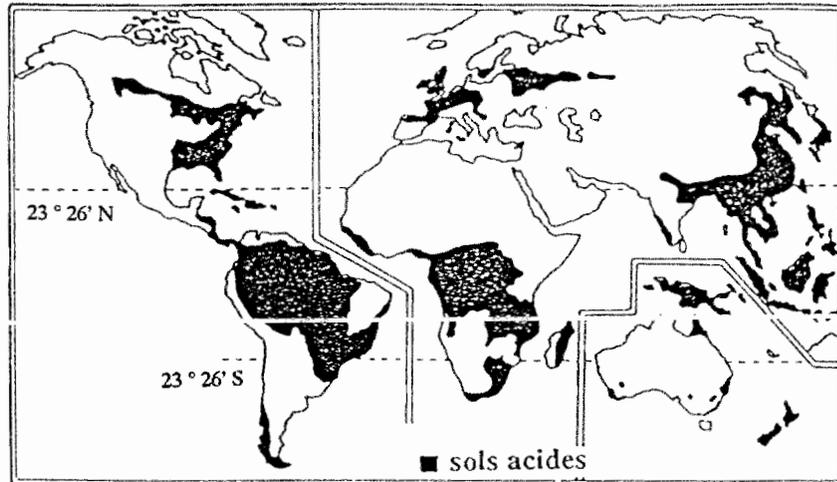


Figure 1.1-1 : Distribution des sols acides dans le monde (WRIGHT *et al.*, 1991).

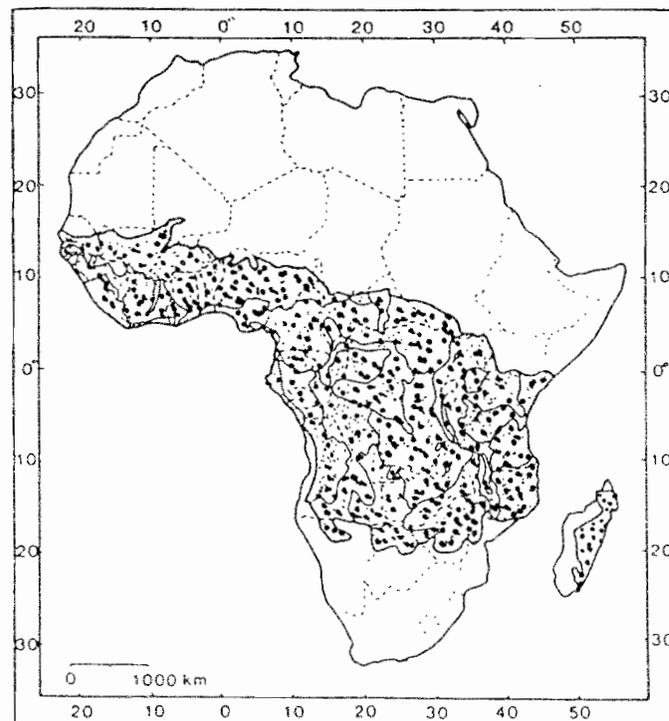


Figure 1.1-2 : Distribution des sols à argiles 1:1 prédominantes en Afrique (VAN WAMBEKE (1991), d'après les données FAO-UNESCO, 1977).

A l'échelle du globe, carte des climats et carte des sols se superposent à peu près et, dans la région intertropicale, la couverture pédologique est essentiellement constituée de sols ferrallitiques (PEDRO, 1985 ; SCHWARTZ, 1990 ; DUCHAUFOR, 1991).

L'étude des «sols tropicaux acides» se limite généralement aux sols normalement drainés de la région intertropicale qui correspondent aux sols ferrallitiques (CPCS, 1969), Oxisols, Ultisols et Alfisols (SOIL SURVEY STAFF, 1975), Ferralsols (FAO/UNESCO, 1976).

Occupant 30 à 38 % des terres émergées du globe, ces sols représentent la majeure partie des terres cultivables dans le monde (SANCHEZ, 1976 ; PEDRO, 1985 ; SANCHEZ et SMYTH, 1987) soit environ 1 700 millions d'hectares dans 72 pays d'Afrique, d'Amérique et d'Asie.

Ces sols couvrent une partie très importante de l'Afrique centrale (FAO/UNESCO, 1976 ; PEDRO, 1985) comme le montre la figure 1.1-2. Leur extension est estimée à 24 millions d'hectares pour le Congo, soit 70 % de la superficie totale du pays (SANCHEZ et SMYTH, 1987).

Les processus de ferrallitisation, à l'origine de la formation et de l'évolution de ces sols expliquent leur acidité. En effet, la ferrallitisation qui débute par une hydrolyse neutre avec acidification progressive (PEDRO, 1985 et 1987 ; SCHWARTZ, 1990 ; DUCHAUFOR, 1991), se traduit par :

- une altération très poussée des minéraux primaires autres que le quartz et quelques minéraux lourds (anatase, rutile, zircon ...),
- l'élimination d'une grande partie de la silice et de la majeure partie des cations alcalins et alcalino-terreux solubilisés lors de cette hydrolyse,
- la néoformation d'argile de type kaolinite, pauvre en silice,
- l'individualisation d'oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (gibbsite, goethite, hématite).

En raison de la durée de leur évolution (DUCHAUFOR, citant plusieurs auteurs, estime qu'une durée de 100 000 ans est un minimum pour une ferrallitisation complète) et de l'importance du drainage, les sols ferrallitiques sont très épais, désaturés en cations basiques et ont donc une **réaction acide**.

A cette acidification résultant des processus pédogénétiques sous climat tropical humide peut s'ajouter celle provoquée par la mise en culture et la dégradation progressive des sols (DABIN, 1985 ; ULRICH et SUMNER, 1991). La mise en culture accélère la perte des cations alcalins (K^+ , Na^+) et alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et leur remplacement par des cations plus acides (H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+}). Les processus responsables en sont (DABIN, 1985 ; VAN BREEMEN, 1991) :

- la lixiviation, favorisée par le drainage climatique accru en sols dénudés ou faiblement couverts.

- les exportations de cations alcalins et alcalino-terreux par les cultures, mal compensées par des restitutions insuffisantes,

- la production d'acides sulfurique et nitrique due à l'action de la microflore tellurique sur certains engrais azotés (NH_4NO_3 et $(NH_4)_2SO_4$) ; ces acides sont des sources potentielles de protons qui déplacent les cations échangeables du complexe.

Les températures élevées de ces régions intertropicales accélèrent les réactions chimiques, stimulent la décomposition de la matière organique, favorisant la formation d'acides organiques et inorganiques – dont le plus courant est l'acide carbonique (H_2CO_3) – qui contribuent à entretenir une ambiance acide dans le sol.

Les végétaux, enfin, agissent aussi sur la réaction du sol à travers leur métabolisme, notamment par exorption de H^+ (CALLOT et *al*, 1982 ; MARSCHNER, 1986) : ce sont les plantes acidifiantes, parmi lesquelles on compte de nombreuses Légumineuses qui affectent le plus le pH du sol par leurs exsudats radiculaires.

Tous ces processus maintiennent ou aggravent l'acidité des sols, qu'il convient donc de mesurer en raison de ses incidences agronomiques.

1.1.2. TYPES D'ACIDITE ET MESURE

Les auteurs distinguent généralement trois types d'acidité (SSSA, 1987 ; CHAMAYOU et LEGROS, 1989 ; BRADY, 1990) :

- l'*acidité actuelle* (libre, active ou réelle), due aux H^+ présents dans la solution du sol

- l'*acidité d'échange*, en relation avec H^+ et Al^{3+} extraits par une solution de sel non tamponnée, comme $KCl M$ ou $NaCl M$;

- l'*acidité résiduelle* (ou potentielle ou totale) qui comprend en outre les fonctions acides du sol non ionisées en totalité.

L'acidité actuelle est couramment appréciée par la mesure du pH, qui est le cologarithme de la concentration en H^+ dans la solution. Cette mesure est réalisée sur une suspension de sol dans l'eau (pH_{eau}), à l'aide d'une électrode reliée à un pH-mètre.

Plusieurs auteurs (SCHOFIELD et TAYLOR, 1955 ; BOLT et BRUGGENWERT, 1978 ; DOLLING et RITCHIE, 1985 ; HELIAR et PORTER, 1989 ; RITCHIE, 1989) estiment cependant que cette mesure devrait se faire dans une solution d'électrolyte qui modifierait le moins possible la distribution des ions entre les surfaces des colloïdes et la solution du sol, c'est-à-dire dans un environnement proche de celui rencontré par les racines des plantes.

Une solution ayant la même force ionique que la solution du sol et reconstituée à partir de la plupart des ions présents dans le sol fournirait la mesure de pH la plus réaliste. Ainsi, DOLLING et RITCHIE (1985) estiment qu'une force ionique $I = 0,005$ est réaliste pour les sols qu'ils étudient alors que GILLMAN (1991) préconise la mesure dans une solution de $CaCl_2$ 0,002 M dont la force ionique (0,006) est proche de la moyenne rencontrée dans les solutions de sols tropicaux acides.

Outre la composition et la concentration de la solution utilisée, la valeur du pH obtenue est influencée par d'autres facteurs, comme le mode de séchage et de stockage de l'échantillon entre le prélèvement et la mesure au laboratoire, le rapport sol/solution, la durée de contact entre le sol et la solution, l'agitation ou non de la suspension au moment de la mesure, la position de l'électrode dans la suspension, la température et la pression de CO_2 (DOLLING et RITCHIE, 1985 ; GILLMAN, 1991).

La position de l'électrode dans la suspension («effet suspension») se traduit par une valeur de pH plus élevée lorsque l'électrode est placée dans le surnageant que lorsqu'elle est immergée dans les particules de sol sédimentées (SPARKS, 1984 ; RITCHIE, 1989).

Dans la méthode française, le rapport sol/solution est conventionnellement fixé à 1/2,5 (BRUCKERT et ROULLER, 1979) et la mesure se fait dans le liquide surnageant, après agitation avec un temps de contact fixé à 30 minutes selon le Référentiel pédologique français (RPF, 1992).

Il n'existe donc pas de méthode universelle de mesure du pH, en raison de la grande diversité des sols (RITCHIE, 1989). Néanmoins, le pH d'un sol

constitue un paramètre important pour apprécier la potentialité d'un sol à assurer la croissance des végétaux.

Si, d'une manière générale, on considère qu'un sol est acide dès que son pH est inférieur à 7, les termes utilisés pour qualifier la réaction du sol en fonction de la plage de pH peuvent être différents suivant les références utilisées comme le montre le tableau 1.1-1.

Tableau 1.1-1 : Qualificatifs de l'acidité du sol selon les systèmes américain (SSSA, 1987) et français (RPF, 1992).

n°	SSSA (1987)	pH	RPF (1992)	pH _{eau}
1	extrêmement acide	< 4,5	hyper-acide	<3,5
2	très fortement acide	4,5 à 5,0	très acide	3,5 à 4,2
3	fortement acide,	5,1 à 5,5	acide	4,2 à 5,0
4	modérément acide	5,6 à 6,0	peu acide	5,0 à 6,5
5	légèrement acide	6,1 à 6,5	neutre	6,5 à 7,5
6	neutre	6,6 à 7,3		

Le pH n'étant cependant qu'un facteur d'intensité et non un facteur de capacité, il ne préjuge pas de la quantité de H⁺ susceptibles d'être libérés dans la solution du sol (VAN BREEMEN, 1991) : c'est, selon la l'expression de BRADY (1990) «la partie visible de l'iceberg».

L'acidité dite d'échange est déterminée après déplacement et dosage des cations acides échangeables au pH du sol (H⁺ et Al³⁺), généralement avec une solution saline non tamponnée comme le KCl M. Plusieurs approches méthodologiques ont été préconisées :

- extraction unique dans un rapport 1/5 (ESPIAU et PEYRONEL, 1976) ou 1/2,5 (URIBE, 1989)

- double extraction dans le rapport 1/5 (ROUILLER et al, 1980 ; ESPIAU, 1986 et 1987 ; ESPIAU et PEDRO, 1989).

- extractions multiples, jusqu'à 20 fois (AMEDEE et PEECH, 1976)

Après extraction au KCl M, trois modes d'analyse sont rencontrés :

- dosage des H⁺ par pH-métrie ($[H^+] = 10^{-pH}$) et des Al³⁺ en spectrométrie d'absorption atomique, la somme donnant l'acidité d'échange, exprimée en cmol(+) kg⁻¹

- titrage potentiométrique de l'extrait avec détermination des points

d'inflexion sur les courbes dérivées, correspondant à Al^{3+} (ESPIAU et PEYRONEL, 1976 ; ESPIAU, 1986 ; ROUILLER et *al*, 1980)

- titrage en point final absolu (pH 8,4), ou virage de la phénolphtaléine (URIBE, 1989).

Ces méthodes ne donnent évidemment pas toutes les mêmes résultats et aucun argument ne permet de dire que l'aluminium est sous la forme Al^{3+} .

En dépit de ces problèmes d'ordre analytique, il apparaît que les valeurs de pH mesurées dans la solution de $\text{KCl } M$ (pH_{KCl}) sont étroitement corrélées à l'acidité d'échange (ESPIAU et PEYRONEL, 1976). Ainsi, la mesure sur le même échantillon de sol du pH_{eau} et pH_{KCl} permet de calculer $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{eau}}$, un paramètre utile pour apprécier la réactivité du complexe adsorbant, en particulier dans les sols tropicaux à charges variables (SANCHEZ, 1976 ; UEHARA et GILLMAN, 1981).

En effet, si ΔpH est positif, la charge nette des colloïdes est positive (capacité d'échange anionique) et s'il est négatif, il y a prédominance des charges négatives (capacité d'échange cationique). Ceci est d'un grand intérêt dans la prévision des possibilités de rétention ou de lixiviation des ions du complexe d'échange.

L'acidité résiduelle ne peut pas être mesurée directement ; elle englobe les charges variables dues aux sites acides de surface (ESPIAU, 1987 ; ROUILLER et *al*, 1980) et peut être neutralisée par le calcaire ou tout autre produit alcalin. Cet aspect sera examiné plus loin (Cf §4.2).

Ces trois types d'acidité s'additionnent pour former l'acidité totale du sol, dont les incidences agronomiques sont examinées ci-après.

1.1.3. INCIDENCES AGRONOMIQUES.

Les conséquences agronomiques de l'acidité du sol s'expriment surtout de façon indirecte, sauf lorsque le pH atteint des valeurs extrêmes ($\text{pH} < 4$).

La prédominance, dans la fraction argileuse, des argiles 1:1 (de type kaolinite) associées à des oxyhydroxydes métalliques confère à ces sols une charge variable en fonction du pH et de la concentration en électrolyte de la solution du sol.

La capacité d'échange est faible, d'où une rétention moindre des

cations d'intérêt agronomique et la charge peut même prendre une valeur positive lorsque le milieu devient plus acide.

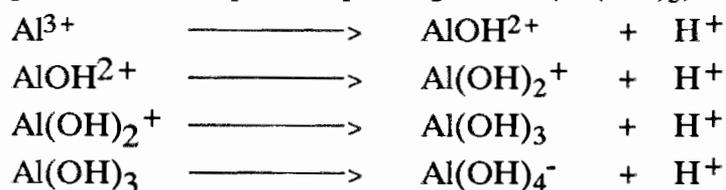
Les surfaces des oxyhydroxydes et les bordures des argiles, en particulier la kaolinite, acquièrent cette charge positive par l'absorption de protons en excès pour neutraliser les charges dues aux ions oxygène et hydroxydes.

Cette réactivité des surfaces confère au sol une capacité de fixation des anions, en particulier du phosphore (JUO et FOX, 1977) et exacerbe la lixiviation des cations. Ces phénomènes seront examinés plus en détail aux §2.2 pour les charges variables et §4.1 concernant les pertes par lixiviation.

L'acidité influence les caractères physico-chimiques et la composition de la solution du sol et par conséquent, la nutrition minérale des plantes.

Dans ces sols acides, l'aluminium joue un rôle important, en raison de son rôle amphotère. A pH inférieur ou égal à 4, les ions hydronium (H_3O^+) de la solution du sol provoquent la dissolution de Al^{3+} des angles des structures minérales et il se forme des ions aluminohexahydronium désignés par $\text{Al}(\text{6H}_2\text{O})^{3+}$ ou notés simplement Al^{3+} (McLEAN, 1976).

Lorsque le pH augmente, ces ions se dissocient en libérant des H^+ selon la séquence suivante passant par la gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) :



L'aluminium existe donc dans la solution du sol, sous forme ionique $\text{Al}(\text{OH})_n^{(3-n)+}$. Il peut occuper une partie des sites du complexe adsorbant libérés par le départ des cations échangeables, être adsorbé et polymérisé sur les surfaces des minéraux argileux (COLEMAN et THOMAS, 1967) ou complexé par la matière organique (HARGROVE et THOMAS, 1981).

En sols acides, certains éléments solubles deviennent toxiques pour les plantes cultivées.

Les répercussions néfastes de l'acidité des sols sur la physiologie des plantes et les baisses de rendement sont généralement attribuées à la présence d'aluminium soluble (KAMPRATH, 1970 ; BOYER, 1976 ; SANCHEZ, 1976 ; PAVAN, 1983 ; BRADY, 1990 ; VAN LIEROP, 1990) ou, dans certains sols, comme ceux du Niari, à celle de manganèse soluble (MARTIN, 1970 ; DABIN, 1985).

La toxicité de l'aluminium est le plus souvent indirecte car l'aluminium perturbe l'alimentation hydrique des plantes, inhibe l'absorption du phosphore, du calcium et au contraire, exalte celle du manganèse (BOYER, 1976 ; COPPENET et al, 1986). En culture hydroponique, il a été prouvé que la toxicité de l'aluminium se traduisait le plus souvent par un raccourcissement des racines.

Le problème du manganèse est moins général, mais dans les sols où il est assez abondant (cas des sols du Niari au Congo), cet élément peut être plus rapidement toxique que l'aluminium lorsque le sol s'acidifie, d'autant plus qu'il est très sensible aux phénomènes d'oxydo-réduction. Les symptômes les mieux connus de la toxicité manganique sur les plantes sont la présence de jeunes feuilles tordues et de taches chlorotiques sur les plus âgées (MARSCHNER, 1986).

Le pH agit aussi sur la répartition et l'activité des micro-organismes et, partant, sur la minéralisation des matières organiques d'une part, et d'autre part, sur l'hydrolyse des composés minéraux, assurant la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970 ; ROBSON et ABBOTT, 1989 ; FLIS et al, 1993). Le pH régit ainsi à la fois la gamme de plantes pouvant être cultivées et leur productivité (WRIGHT et al, 1991).

D'une manière générale, la réaction du sol influence la solubilité des éléments nutritifs et, partant, leur disponibilité pour les plantes, comme l'illustre la figure 1.1-3.

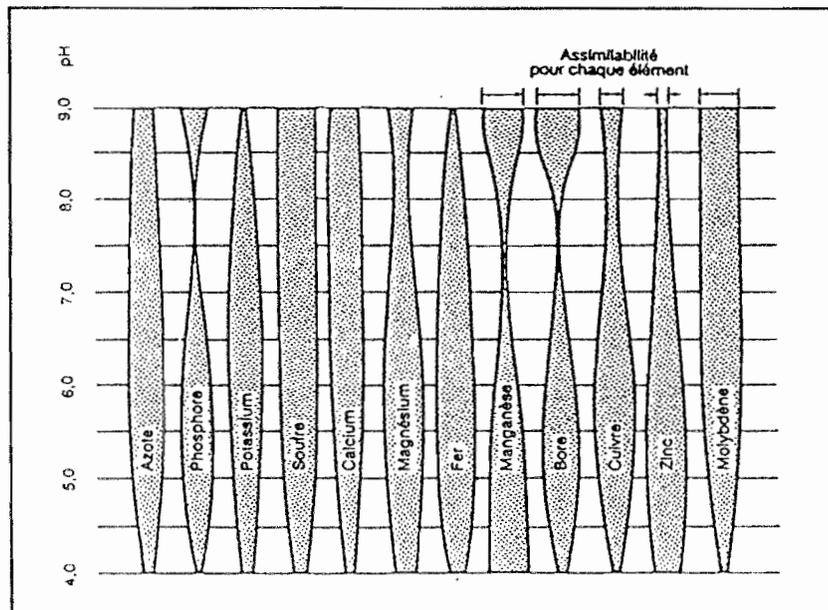


Figure 1.1-3 : Influence du pH sur la disponibilité des éléments nutritifs (MENGEL et KIRKBY, 1978 ; CALLOT et al, 1982 ; CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

La largeur de la bande indique la disponibilité potentielle et non la quantité actuelle de l'élément.

Il en ressort que, les valeurs optimales de pH pour la solubilité de la plupart des éléments sont comprises entre 5,5 et 6,5 (MENGEL et KIRKBY, 1978 ; BOYER, 1982 ; CALLOT *et al*, 1982 ; CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

Un pH inférieur à 5,5 est considéré comme préjudiciable aux cultures et tous les auteurs s'accordent sur le fait qu'en deçà de cette valeur de pH, **une correction de l'acidité** est nécessaire.

Il est cependant difficile, pour une situation donnée, de déterminer si le problème de croissance des plantes provient d'une ou plusieurs toxicités ou d'une ou plusieurs carences.

A l'issue de cette revue des problèmes généraux liés à l'acidité des sols, les cas particuliers des sols acides du Congo sont examinés.

1.2. LES SOLS ACIDES DU CONGO

Situé entre le 4^e degré de latitude nord et le 5^e degré de latitude sud, le Congo est entièrement compris dans la zone tropicale humide, qui est le domaine des sols à altération géochimique poussée marquée par une tendance à l'appauvrissement en cations alcalins et alcalino-terreux avec acidification (PEDRO, 1985).

La forêt occupe environ 65% de la superficie du pays, mais ce sont les sols sous savane qui, soumis à la culture mécanisée intensive, sont surtout concernés par les problèmes posés par l'acidité. Ces savanes s'étendent essentiellement sur **les plateaux Batéké et dans la Vallée du Niari** (PEYROT, 1977), régions dans lesquelles ont été choisies les situations étudiées.

Les facteurs du milieu les plus importants pour la pédogenèse (climat, lithologie, physiographie, et végétation) sont présentés dans la suite du texte, avant d'aborder l'historique des travaux menés sur l'acidité des sols.

1.2.1. LES CADRES NATURELS DE L'ETUDE

1.2.1.1. Situation géographique

Les cartes de la figure 1.2-1 permettent de localiser les deux régions d'investigation, la Vallée du Niari et le plateau de Mbé-Batéké, situées respectivement au sud-ouest et au sud du Congo.

La «Vallée du Niari» n'est pas à proprement parler une vallée, mais un vaste synclinal, orienté NO-SO et drainé par le Niari et la Nyanga (BRUGUIERE, 1953 ; BOCQUIER et GUILLEMIN, 1959 ; PETIT, 1975).

C'est une dépression dissymétrique disposée en arc de cercle, qui s'étire en s'élargissant d'est en ouest, entre le Massif du Chaillu au nord-est, la chaîne montagneuse du Mayombe au sud-ouest et le Plateau des Cataractes au sud-est.

La «Vallée du Niari», dans son acception restreinte, est une zone à topographie relativement plane, longue d'une centaine de kilomètres et large d'une vingtaine qui s'étend sur la rive gauche du fleuve Niari, entre les agglomérations de Loutété et de Loudima. Elle est située au 4^e degré de latitude Sud et comprise entre les 13^e et 14^e degrés de longitude Est.

Les plateaux Batéké s'étendent, au nord de Brazzaville, sur 13 000 km² environ, entre les 2^e et 4^e degrés de latitude Sud. Limités au nord par la Cuvette congolaise, ils sont séparés par des coupures profondes qui permettent de distinguer quatre unités bien individualisées : plateaux de Mbé (7 500 km²), de Nsa (4 042 km²), de Djambala (1 010 km²) et Koukouya (410 km²) (DE BOISSEZON, 1965 ; DE LA SOUCHERE, 1974).

Le plateau de Mbé ou plateau Batéké *sensu stricto* est compris entre les rivières *Louna*, *Léfini* et le fleuve Congo.

1.2.1.2. Climat

La partie méridionale du Congo, qui s'étend des Plateaux Batéké (au sud d'une ligne Kindamba-Ngabé) à la Côte atlantique est soumise au climat «bas-congolais», tropical semi-humide de type soudano-guinéen de transition (AUBREVILLE, 1949 ; BOCQUIER et GUILLEMIN, 1959 ; SCHWARTZ, 1988). Ce climat, subéquatorial à forte influence océanique (SAMBA-KIMBATA, 1978 ; MPOUNZA et

SAMBA-KIMBATA, 1990), est remarquable par l'homogénéité de son régime pluviométrique influencé par l'alizé atlantique et les eaux froides du courant de Benguela cheminant au-dessus des eaux chaudes guinéennes (BOCQUIER et GUILLEMIN, 1959).

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 1400 mm et le nombre moyen de jours de pluies par an oscille entre 75 et 100. La répartition mensuelle des précipitations fait apparaître :

- une grande saison sèche de quatre mois environ, de mi-mai à fin-septembre, en liaison avec l'extension septentrionale maximum en août de l'alizé austral et l'extension maximum concomitante du courant froid de Benguela longeant le littoral angolais et bas-congolais ; elle coïncide avec un minimum de température et de tension de vapeur d'eau.

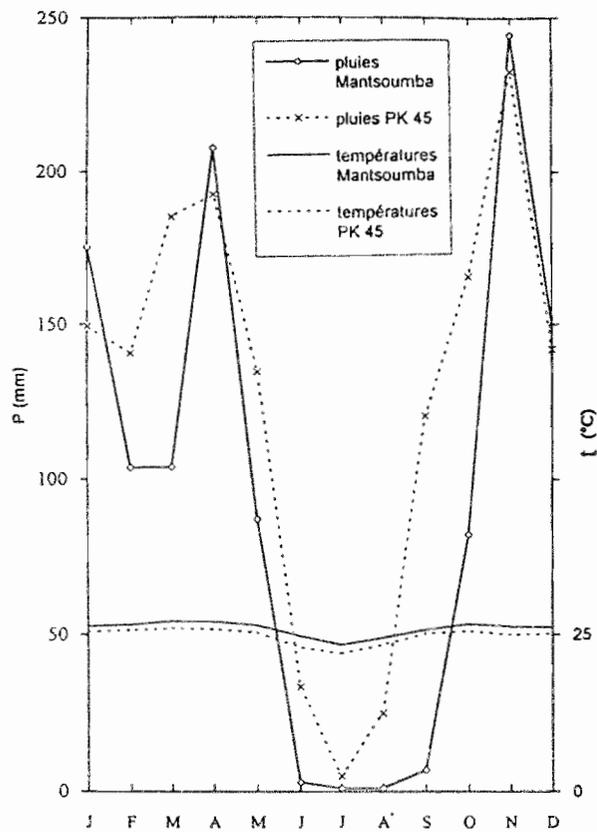
- une longue saison de pluies de huit mois avec deux maxima (un maximum relatif en novembre et un absolu en mars-avril) ; elle est marquée par un ralentissement des pluies en janvier-février, mais selon MAKANY (1976), aucun de ces mois n'est écologiquement secs, tels que définis par différents auteurs (AUBREVILLE : 30 mm ; TROCHAIN et MANGENOT : 50 mm ; GAUSSEN : pluviométrie inférieure ou égale au double de la température pour le mois considéré). Cette période dite «petite saison sèche» est d'une grande importance agronomique car elle permet de distinguer un premier cycle pluvieux d'octobre à janvier et un second de mars à mai correspondant à deux saisons culturales.

Des nuances locales sont introduites par des facteurs divers comme l'orientation des reliefs, l'altitude et la latitude, la végétation et, dans une moindre mesure, les étendues d'eau marécageuses et continentales. Ainsi, la Vallée du Niari, abritée de l'alizé atlantique austral par la chaîne du Mayombe, est une zone de relative indigence pluviométrique (1200 mm d'eau), contrairement aux plateaux Batéké (1500 mm à Mbé) qui connaissent une pluviométrie croissant avec l'altitude.

La figure 1.2-2 présente les données climatologiques des deux régions.

L'irrégularité interannuelle des précipitations est très sensible : la variabilité intercyclique, de 15 à 25% au Niari, est la plus importante du Bas-Congo après la zone côtière, tandis que le plateau de Mbé ne présente que des variations inférieures à 15% (SAMBA-KIMBATA, 1978).

La température moyenne annuelle oscille entre 24 et 26 °C et les amplitudes annuelles sont faibles (4 à 6 °C). Les températures des mois les plus chauds (mars-avril) sont supérieures à 30 °C et c'est dans la dépression du Niari qu'elles sont les plus élevées du Bas-Congo.



N.B.: La saison sèche est matérialisée par les parties où la courbe des précipitations passe au-dessous de celle des températures ($P < 2 t$).

Figure 1.2-2 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson pour les deux sites d'étude (d'après données ORSTOM et Service de météorologie Nationale).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
P	126	127	185	210	123	2	0,9	2	33	141	227	183	1370
ETP	88	92	116	104	87	83	83	83	87	88	92	87	1070

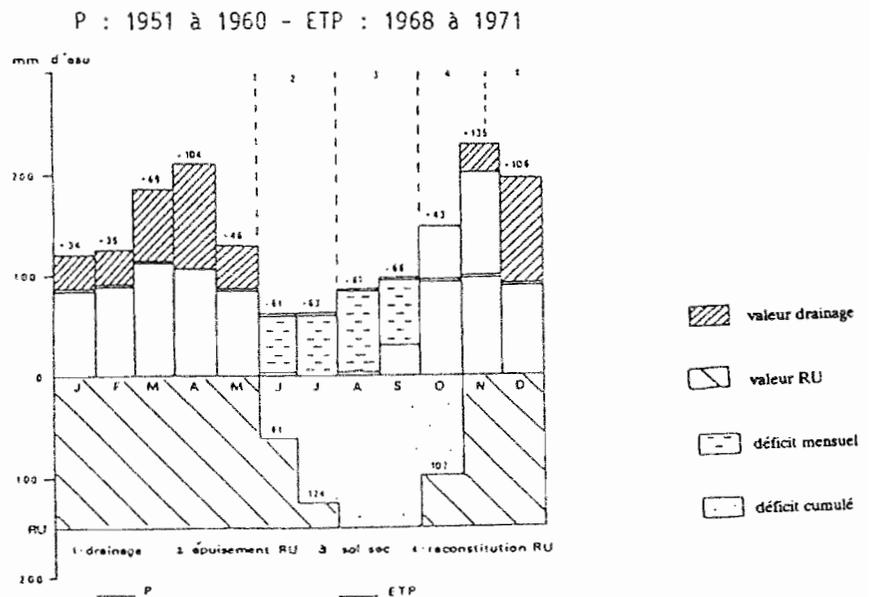


Figure 1.2-3 : Bilan P-ETP-RU à Brazzaville, avec une réserve utile fixée arbitrairement à 150 mm (SCHWARTZ, 1988 d'après les données de RIOU, 1975).

On note un net rafraîchissement au-dessus de 500 m d'altitude, notamment dans les plateaux Batéké où la température descend en saison sèche à 13 à 16 °C.

L'humidité relative est toujours élevée : d'environ 98% en saison pluvieuse, elle atteint un minimum voisin de 73% en septembre, ce qui contribue à donner une impression de chaleur lourde ressentie en dépit des températures rarement excessives. Facteur générateur de précipitations, cette humidité relative détermine un ciel nuageux, réduit l'insolation, engendre des rosées nocturnes et accentue la sensation de froid en saison sèche (MAUMON et GRIVEAU, 1968).

L'insolation est assez faible (1700 heures par an). Les vents sont très faibles, avec une vitesse inférieure à 5 m s⁻¹ ; ce sont généralement des brises locales, caractéristiques des basses latitudes (SAMBA-KIMBATA, 1978). Ces vents ont un effet desséchant notoire sur le plateau de Mbé, tandis que dans la Vallée du Niari, les problèmes d'alimentation hydrique des cultures de manioc à Mantsoumba sont surtout fonction des pluies (NYAMBA, 1991). Le facteur température est secondaire dans les indices de sécheresse.

Les données existant sur les bilans d'eau dans le sol en climat bas-congolais (SCHWARTZ, 1988 à partir des données de RIOU, 1975) montrent que dès la fin du premier mois de la saison des pluies (octobre), le sol est soumis à un drainage non négligeable (fig. 1.2-3).

1.2.1.3. Géologie et géomorphologie

Le substrat géologique de la Vallée du Niari est constitué par des sédiments schisto-calcaires d'âge précambrien appartenant au Système du Congo-Occidental et subdivisés en trois couches (DADET, 1969). Les plateaux sont localisés sur l'étage moyen SC_{II} composé d'une alternance de calcaires très argileux, compacts, de teintes délavées et de marnes gréseuses de couleur lie de vin (DADET, 1969).

Vaste zone déprimée au milieu de reliefs plus accidentés, la Vallée du Niari apparaît comme «perchée» au-dessus d'un réseau hydrographique qui s'y encaisse partout de plusieurs mètres. SAUTTER (1966) signale d'ailleurs ce curieux divorce du fleuve et de sa plaine. Géomorphologiquement, trois étages y sont distingués : la plaine (ou terrasse) alluviale du Niari à 160 m, les plateaux à 180 m et les collines à 200 m d'altitude (fig. 1.2-4).

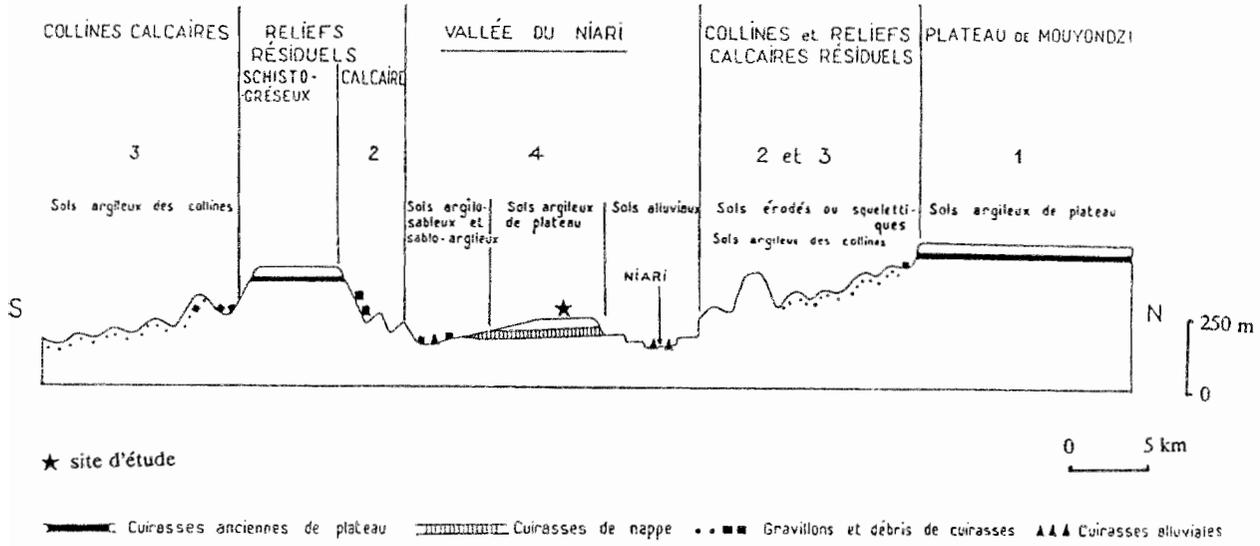


Figure 1.2-4 : coupe schématique du synclinal schisto-calcaire (d'après BOCQUIER et GUILLEMIN, 1959).

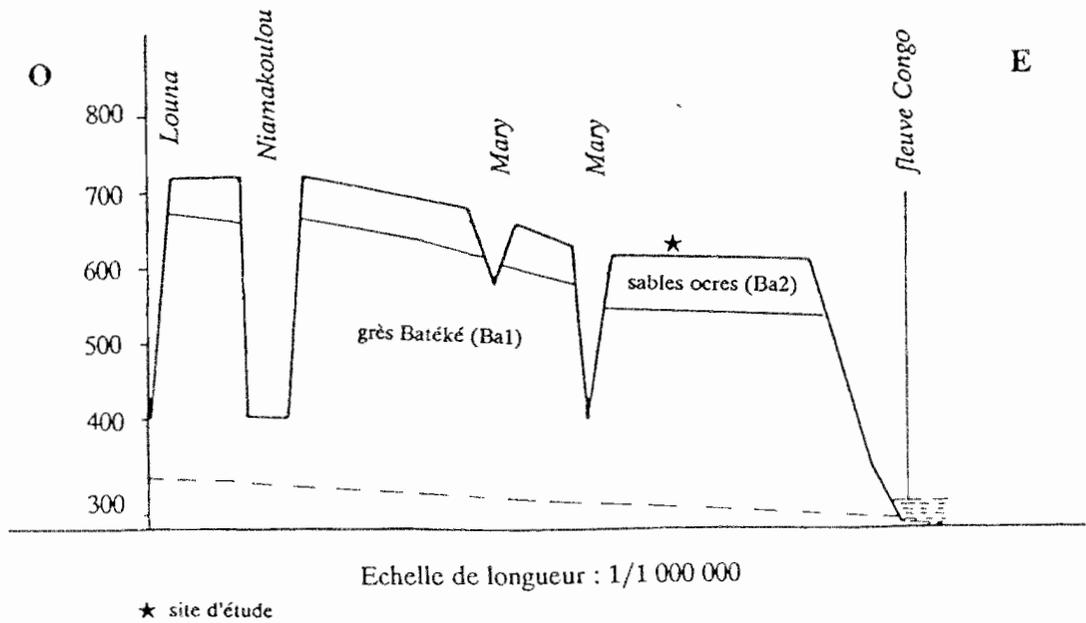


Figure 1.2-5 : coupe schématique à travers le plateau de Mbé-Batéké montrant les positions relatives des différentes formations (d'après LE MARECHAL, 1966).

Dans la Vallée du Niari, ces plateaux forment une série d'interfluves, surfaces tabulaires largement ondulées, renfermant quelques dépressions marécageuses et dolines occupées ou non par des étangs ; leur raccordement avec les terrasses se fait par des talus d'environ 30 m prolongeant parfois des collines résiduelles (BOCQUIER et GUILLEMIN, 1959).

Les **plateaux Batéké**, vastes plateaux mamelonnés d'aspect semi-désertique très caractéristique, constituent les restes d'une surface structurale disséquée en quatre unités par l'érosion linéaire donnant naissance à des vallées profondément encaissées de 300 mètres (De BOISSEZON, 1965 ; DE LA SOUCHERE, 1974).

Situés entre 700 et 800 m d'altitude (fig. 1.2-5), ils présentent une unité géologique et morphologique et sont faiblement inclinés vers le nord-est (Cuvette congolaise). Sur le plateau de Mbé, DE LA SOUCHERE (1974) relève une pente SO-NE de 1,26 ‰ et des pentes est-ouest variant autour de 1,5 ‰ et atteignant rarement 2 ‰.

Le substrat géologique de la série détritique des plateaux Batéké comprend une couche supérieure meuble (sables ocres du Ba2) reposant en concordance sur des grès polymorphes (Ba1). Ces derniers sont représentés par des grès tendres, jaunes, blancs ou roses, à grain fin et régulier, sans stratification marquée, datant du Paléogène (MAUMON et GRIVEAU, 1968 ; DADET, 1969 ; GIRESSE, 1991). L'étude morphoscopique permet de leur attribuer une origine éolienne (LE MARECHAL, 1966). La couche supérieure (sables ocres ou limons sableux) est un matériau sablo-argileux à sablo-faiblement argileux, qui provient d'une reprise aquatique de ces grès au Néogène, pauvre en minéraux altérables et de perméabilité élevée.

Sur ces surfaces relativement planes et monotones, on note la présence d'un réseau de vallées sèches et de cuvettes humides qui créent un méso-relief onduleux (LE MARECHAL, 1966). Ces vallées ont un fonctionnement de type cataclysmique (GUILLOT et PEYROT, 1979), avec écoulement temporaire lors des pluies exceptionnelles. Ce qui fait que les plateaux Batéké, avec la rareté des eaux de surface sont considérés comme le «désert congolais». Cependant, la perméabilité élevée du substratum géologique couplée à l'abondance des pluies font des plateaux Batéké «le château d'eau» du Congo, car plusieurs cours d'eau, parmi lesquels le Niari, l'Ogooué et la Léfini et y prennent leur source.

1.2.1.4. Végétation

Bien que le climax général soit forestier au Congo (AUBREVILLE, 1949 ; KOEHLIN, 1961 ; MAKANY, 1976), ces deux zones de plateaux sont essentiellement couvertes de savanes plus ou moins arborées. Les forêts n'acquièrent une certaine importance qu'en bordure de plateau, sous forme de galeries forestières le long des cours d'eau ou de petits massifs isolés et des bosquets anthropiques à l'emplacement d'anciens villages.

Il est possible de distinguer des groupements végétaux différents suivant les substrats sur lesquels ils poussent (BOCQUIER et GUILLEMIN, 1959).

Dans la Vallée du Niari, la végétation typique sur la série schisto-calcaire est une savane arbustive à *Hyparrhenia diplandra* et *Annona arenaria* (KOEHLIN, 1961). Elle est caractérisée par la dominance presque exclusive de *Hyparrhenia diplandra* dont les chaumes dépassent souvent 2 mètres et forment un feutrage serré (SAUTTER, 1966). La strate herbacée peut également comprendre *Hyparrhenia lecomtei*, *Andropogon schirensis*, *Schizachyrium platyphyllum* et de nombreuses autres espèces qui apparaissent dans les jachères (JAMET, 1975). On note également la présence, en peuplements presque purs, de l'herbe à éléphants (*Pennisetum purpureum*) sur les bourrelets de berge des affluents du Niari comme la Nkenké (KOEHLIN, 1961).

La strate arbustive y est dense : 200 arbustes à l'hectare pouvant atteindre 4 m de haut selon KOEHLIN (1961). Celle-ci peut comprendre *Bridelia ferruginea*, *Vitex madiensis* et *Milletia versicolor*. Dans ces savanes à *Hyparrhenia diplandra*, *Annona arenaria* contribue à définir un milieu plus sec et *Bridelia ferruginea*, un milieu plus humide, à drainage imparfait (SAUTTER, 1966).

La savane présente sur les plateaux Batéké est faiblement arbustive à *Trachypogon tholonii* et *Hymenocardia acida*, d'aspect steppique par endroit.

La dominance de *Hyparrhenia diplandra* traduit localement un enrichissement du sol en argile (MAKANY, 1976) et la présence de formations herbeuses basses steppiques à *Loudetia simplex* caractérise les dépressions hydromorphes, les lousseké, unité de paysage correspondant aux sols podzolisés (SCHWARTZ, 1988).

Dans les deux cas, la végétation est marquée par les feux de brousse pluriannuels qui réduisent les restitutions organiques au sol.

En définitive, il ressort que dans les deux régions, la perméabilité suffisante des matériaux (sables Batéké et complexe d'altération ferrallitique du matériau schisto-calcaire du Niari) et la pluviométrie, font que le drainage climatique et la lixiviation sont des processus très importants dans l'évolution de ces sols.

Dans le cas du Niari, les sols profonds et bien drainés n'ont plus, sur le plan des caractéristiques chimiques, que des rapports très limités avec la nature calcaire de la roche en place.

Tout ceci se traduit par un **pH bas dans l'ensemble du profil** de sol et de faibles taux de saturation du complexe adsorbant en cations alcalins et alcalino-terreux.

La végétation assure néanmoins un certain nombre de mécanismes compensateurs de l'entraînement des cations en profondeur : restitutions organiques, maintien d'une activité biologique, remontées biologiques, couverture du sol et retour de l'eau dans l'atmosphère par évapotranspiration, limitant le drainage.

Dans les deux cas, on a ainsi affaire à des **sols naturellement acides** en rapport avec les conditions du milieu.

1.2.1.5. Sols retenus : position du problème

L'unité géomorphologique de base des deux régions étudiées est le plateau à faibles pentes, surface pénéplanée disséquée par une reprise de l'érosion le long des cours d'eau ou des vallées sèches et renfermant quelques dépressions sèches ou humides.

Dans ces deux régions, il existe plusieurs types de sol en relation avec des facteurs stationnels (lithologie, topographie, hydromorphie).

La présente étude ne concerne cependant pas, dans la Vallée du Niari, les sols minéraux bruts, argileux de colline, hydromorphes des dolines et de la plaine alluviale du Niari (BRUGIERE, 1953 ; DENIS et RIEFFEL, 1975 ; TOUTOU-MISSIE, 1985).

Elle exclut également, sur les Plateaux Batéké, les sols des plateaux Koukouya et Djambala, à teneurs en argile (35%) et en matière organique plus élevées (DE BOISSEZON, 1965) que sur le plateau de Mbé, les paléopodzols à nappe perchée, ainsi que les sols hydromorphes de fond de vallée et de cuvettes humides

sur sables Batéké (SCHWARTZ, 1988).

Seuls les sols présentant un intérêt pour la culture mécanisée intensive font l'objet de ce travail : sols ferrallitiques fortement désaturés jaunes argileux profonds de plateau qui couvrent 150 000 hectares dans la Vallée du Niari et les **sols ferrallitiques fortement désaturés jaunes psammitiques profonds** qui, eux occupent la majeure partie des sols bien drainés des 750 000 hectares du plateau de Mbé.

Les régions retenues permettent ainsi d'étudier **deux pôles texturaux bien contrastés : sols argileux** de plateau de la Vallée du Niari (40 à 60% d'argile) et **sols sableux** du plateau de Mbé (moins de 10% d'argile).

Avec un relief doucement ondulé ou nettement aplani, dont les pentes relevées ne constituent nullement une restriction à la mécanisation agricole, selon les normes FAO rapportées par SYS (1978), cité par BOYER (1982), ces plateaux se prêtent bien à une exploitation agricole de type mécanisé (SAUTTER, 1966 ; DE BOISSEZON et *al*, 1969 ; MARTIN, 1975).

Ces possibilités agricoles, signalées dès le début du siècle, ont entraîné la mise en valeur de ces sols qui commence dans les années 1940.

1.2.2. APERÇU HISTORIQUE DE LA MISE EN CULTURE MECANISEE ET DES RECHERCHES SUR LES SOLS ACIDES DU CONGO.

Trois périodes peuvent être distinguées : avant 1949, la période 1949-1964 et à partir de 1974.

1.2.2.1. Avant 1949

La mise en valeur «moderne» des vastes étendues de savane est l'oeuvre aussi bien de colons et de sociétés privées (SOFICO, SIAN...) que d'organismes administratifs (IFAC, IRHO, CGOT).

Dès 1934, avec l'inauguration du Chemin de Fer Congo-Océan (CFCO), commence la mise en valeur agricole des zones à topographie plane du Niari et des plateaux Batéké.

Le démarrage véritable d'une «expérience agricole de grand style» (SAUTTER, 1966) a lieu en 1947-48 avec l'adoption d'un plan décennal d'équipement et de développement de l'Afrique Equatoriale Française conçu dans le cadre du Plan MARSHALL. Des machines sont achetées et deux centres de

motoculture sont créés : Inoni sur le plateau de Mbé-Batéké et Loudima sur le plateau de Télémine (Vallée du Niari), où 8 000 hectares d'arachide de bouche sont cultivés en assolement avec soja, maïs et patates.

L'expérience d'Inoni connaît rapidement un échec et il n'existe que très peu de données sur les premières tentatives de culture mécanisée sur les plateaux Batéké. Tout l'effort s'est alors porté sur le Niari où les sols argileux profonds de plateau suscitent un grand intérêt : bonne structure en surface, perméabilité suffisante et capacité de rétention d'eau assez élevée constituent autant de facteurs favorables aux cultures (DE BOISSEZON et *al*, 1969).

Dès 1946, le Secteur de Modernisation Agricole (SMA), installé à Loudima une Cellule de Recherches, transformée en 1953 en Station de Recherches : l'objectif est la production de 120 000 tonnes par an d'arachides décortiquées exportables.

Le SMA, organisme administratif, dépendant de l'Inspection Générale de l'Agriculture de l'Afrique Equatoriale Française, devait, sur deux concessions totalisant 27 000 ha, de part et d'autre du poste de Loudima, mettre au point les techniques de culture mécanisée destinées à être généralisées dans la Vallée du Niari.

L'Institut de Recherches sur le Coton et les fibres Textiles (IRCT) qui, en 1948, s'installe près de Madingou pour y cultiver le cotonnier (*Gossypium hirsuta*) et des plantes à fibres, succédanés du jute (notamment *Urena lobata* et *Triumfetta sp*), connaît très vite des problèmes de «stérilité des sols au cours d'une seule saison» (MAUMON et GRIVEAU, 1968).

L'Institut des Recherches sur les Huiles et Oléagineux (IRHO), installé à Sibiti depuis 1942 pour le palmier à huile, est appelé en novembre 1948 à développer la culture de l'arachide à Loudima sur les terres du SMA, après l'abandon de l'expérience de culture mécanisée tentée sur les plateaux Batéké. Les conditions d'utilisation du matériel sont étudiées et les problèmes de récolte - arrachage - séchage - battage sont abordés (MAUMON et GRIVEAU, 1968). L'action pilote du SMA est poursuivie à partir de 1951 par la Compagnie Générale des Oléagineux Tropicaux (CGOT) qui favorise la culture exclusive de l'arachide jusqu'en 1958 (RAUNET, 1982).

Tout comme l'IRHO, la CGOT se heurte au même problème de baisse rapide des rendements de l'arachide dès la deuxième saison de culture.

La Société industrielle et agricole du Niari (SIAN), qui a abandonné la culture du manioc pour la monoculture arachidière en grandes surfaces n'est pas épargnée et se tourne progressivement vers la canne à sucre.

Toutes ces impasses et erreurs coûteuses sont dues au fait que les règles cartésiennes de la logique n'ont pas été respectées (MARTIN, 1970) : la mise en culture de surfaces importantes a précédé l'inventaire des sols et les études agropédologiques qui n'ont débuté respectivement qu'en 1949 et 1953.

1.2.2.2. La période 1949-1964

C'est le début d'une ère de collaboration fructueuse avec les pédologues du Centre ORSTOM de Brazzaville (ERHART, 1947 ; BRUGUIERE, 1951 et 1953 ; AUBERT, 1955) sur les plateaux Batéké et surtout dans la Vallée du Niari.

Cette période dite de «Quinze ans de travaux et de recherche dans les pays du Niari» a fait l'objet de nombreuses publications dont la synthèse générale a été rédigée par MAUMON et GRIVEAU (1968).

Les observations et expérimentations courantes et les études originales ont permis de comprendre une partie des phénomènes responsables de multiples échecs culturels (JULIA, 1953 ; OLLAGNIER et PREVOT, 1955 ; AUBERT, 1955 ; PREVOT et *al*, 1955).

La dénudation du sol et les travaux importants effectués pour les cultures industrielles (arachide, cotonnier, maïs,...) entraînent des pertes en cations, essentiellement en calcium et magnésium, en relation avec l'importance du drainage et les exportations par les récoltes. Le problème se complique du fait de fortes teneurs en manganèse total dont la plus grande partie est sous forme facilement réductible. La baisse de pH qui s'en suit, s'accompagne du passage de cet élément à des formes solubles et des toxicités se manifestent chez les plantes cultivées.

Le cotonnier est extrêmement sensible à l'excès du manganèse du sol : des accidents culturels surviennent et la culture n'est plus rentable dès que le pH 4,8 est atteint (FRANQUIN, 1958 ; MARTIN, 1970).

La toxicité manganique sur arachide est manifeste avec des teneurs de 1000 mg kg⁻¹ déterminée par diagnostic foliaire dans la feuille de rang 4 ; la valeur de 5 830 mg kg⁻¹ a même été atteinte dans un essai d'épuisement du sol à Loudima (PREVOT et *al*, 1955). Il semble cependant qu'il s'agisse surtout pour l'arachide d'une carence en calcium, s'accompagnant d'une sensibilisation à l'excès de manganèse du sol (MARTIN, 1970).

Il est alors préconisé l'utilisation d'amendements calcaires pour lutter contre la décalcification des sols et les phénomènes de toxicité manganique.

Les premières expériences d'amendement calcaire dans la Vallée du Niari sont rapportées par MARTIN (1958).

A Loudima une application de 2 t ha⁻¹ de chaux agricole porte le pH de 4,4 à 5,2 et il est préconisé de compléter cet apport par 500 kg ha⁻¹ an⁻¹ les années suivantes. Pour des pH voisins de 5 et 5,25 une dose «préventive» de 500 kg ha⁻¹ tous les 2 ans paraît suffisante, mais les sols à pH = 4,0 nécessiteraient 4 t ha⁻¹ de chaux, fractionnés en 2 t la 1^{re} année et 2 t la 2^e année ou encore 2/3 de la dose la 1^{re} année et 1/3 la 2^e année (MARTIN, 1959).

L'apport de calcium sous forme de chaux ou de calcaire broyé fait disparaître les symptômes de la toxicité manganique et améliore les rendements. Parallèlement, la teneur en calcium des plantes s'élève.

Les pertes en cations sont importantes et évaluées à 250 kg CaO ha⁻¹ an⁻¹ (MARTIN, 1961 ; DABIN, 1985).

La diversité des méthodes préconisées par les différents instituts ayant travaillé dans le Niari montre à quel point le problème de l'acidité et de son corollaire, la toxicité manganique est délicat (MARTIN, 1968). La complexité de ce problème explique l'intérêt qui y a été porté sans qu'il ne s'en dégage rien d'absolument définitif et décisif pour l'agriculture congolaise (MAUMON et GRIVEAU, 1968).

1.2.2.3. A partir de 1964

De 1964 à 1974, il y a ralentissement des activités de recherche par le Congo, faute de moyens financiers, matériels et humains.

La reprise des travaux de recherche se fait avec la création du Centre de Recherches Agronomiques de Loudima (CRAL) et le lancement d'une politique agricole préconisant «une mécanisation lente, prudente et progressive» (C.N.A., 1986).

Les amendements calcaires sont toujours envisagés dans la gestion de la fertilité des sols et il convient de relier l'intérêt que présente leur incorporation au sol à la valorisation des calcaires dolomitiques locaux du Niari, dont il existe d'ailleurs une usine de broyage près de Madingou.

En 1972, sur les terres de Desplanches-Neeser initialement utilisées pour la polyculture associée à l'élevage, le gouvernement congolais crée le Complexe Agro-Industriel d'Etat de Mantsoumba (CAIEM). C'est une usine de production de farine de manioc alimentée par une culture mécanisée en régie

directe (1600 hectares de surface agricole utile, 400 hectares récoltés par an) et par un paysannat encadré par l'opération de petite motorisation agricole (OPMA).

Des essais de fertilisation, de travail du sol et de rotation menés sur les plantations de plateau du CAIEM de 1972 à 1985 par la cellule technique gérée par le Bureau pour le Développement de la Production Agricole (BDPA) ont abouti à la détermination du système cultural pratiqué. Pour un cycle cultural de deux ans, un apport systématique est réalisé au moment de la plantation : 1600 kg ha⁻¹ de calcaire broyé de Madingou, 100 kg ha⁻¹ d'urée, 100 kg ha⁻¹ de supertriple et 100 kg ha⁻¹ de KCl.

TOUTOU-MISSIE (1985) constate que les sols ainsi exploités par le CAIEM en mécanisé, présentent des signes graves de dégradation physique et chimique par rapport aux sols sous savane. Les rendements du manioc s'échelonnent entre 4 et 18 t ha⁻¹ pour l'ensemble de l'exploitation alors que l'on atteint 30 t ha⁻¹ en milieu paysan bien conduit (MOREAU, 1985) et 27 t ha⁻¹ sur site non dégradé (NYETE, 1993, *communication personnelle*), pour les variétés *Moudouma*.

Dans le cadre de l'étude des effets de l'amendement calcaire sur ces sols du CAIEM, NZILA (1986) compare au laboratoire, sur colonnes de percolation, les effets de l'incorporation de calcaire broyé de Madingou, de chaux vive et de paille de maïs sur la composition des percolats. Les quantités sont calculées pour compenser le déficit de saturation de la capacité d'échange à pH 6,5. Pour une densité apparente moyenne du sol en place de 1,2, ces quantités correspondent à des apports de 3426, 1824 et 12000 kg ha⁻¹, respectivement pour le calcaire, la chaux et la paille. Les résultats de cette étude indiquent qu'il n'y a pas, au bout de deux mois, de différence significative entre les trois apports pour le pH et les cations échangeables y compris l'aluminium. Les pertes par lixiviation les plus fortes sont obtenues pour le traitement avec paille de maïs.

DZABA (1987), travaillant en vases de végétation, montre qu'un apport de calcaire broyé au sol (3,77 t ha⁻¹ pour le sol de Loudima dans la Vallée du Niari et 2,83 t ha⁻¹ pour celui d'Odziba sur le plateau de Mbé) entraîne une augmentation générale des rendements en tubercules de manioc frais, allant jusqu'à trois fois le témoin sans calcaire. Cette étude révèle un effet mobilisateur du calcaire à l'égard des ions phosphoriques de la fraction inorganique, les rendant ainsi disponibles pour le manioc cultivé.

DJONDO (1987) étudie, dans un essai factoriel au champ, l'influence du brûlis et de l'apport de calcaire broyé de Madingou (2 t ha⁻¹) sur le comportement de l'arachide cultivé sur un sol sur sables Batéké de la région de Brazzaville. Les

résultats obtenus montrent que, contrairement au brûlis, le calcaire broyé n'a qu'un effet peu marqué sur la nodulation, le poids sec des parties aériennes et les rendements de trois variétés d'arachide. L'interaction brûlis - calcaire est en outre non significative.

D'autres études sur l'acidité des sols de la Vallée du Niari sont conduites au Laboratoire d'étude des sols cultivés du Centre ORSTOM de Brazzaville. Les travaux portent sur l'influence de doses croissantes de calcaire broyé de Madingou (MBOM, 1991) et sur l'influence de la durée de contact (NDANDOU, 1992). Les principaux résultats montrent que la dose de 4 t ha⁻¹ serait à recommander pour la plupart des sols prélevés autour de Madingou.

On sait par contre peu de choses sur les sols sableux du plateau de Mbé : une carence grave en calcium a été mise en évidence à Odziba par la technique des vases de végétation (DZABA, 1984), ainsi que l'incidence du calcaire sur le fractionnement du phosphore (DZABA, 1987).

L'expérience récente de la société BELIN INTERNATIONAL est très évocatrice de la difficulté de gérer ces sols en culture mécanisée intensive : installée en août 1983 à Odziba sur le plateau de Mbé pour y faire de la culture mécanisée du maïs sur 2000 hectares, cette société arrête ses activités en août 1985, après seulement deux cycles culturaux. Seule la Ferme de manioc de Mbé a pu maintenir ses activités dans cette zone.

En conclusion , il ressort de cette revue qu'**après un demi-siècle de travaux et d'études menés sur la mise en culture mécanisée des sols du Congo, le problème de l'acidité demeure d'actualité.** La plupart des travaux ayant été conduit dans le cadre d'études générales d'agronomie (MAUMON et GRIVEAU, 1968), les mécanismes du **fonctionnement physico-chimique des sols ont été peu abordés.**

La présente étude essaie de remédier à cette situation, le but visé étant une meilleure connaissance du fonctionnement physico-chimique du sol afin de mieux raisonner les apports à réaliser.

Dans la perspective d'une meilleure identification des problèmes qui se posent dans la correction de l'acidité de ces sols cultivés, un constat de situation est réalisé dans les expérimentations existant actuellement dans la Vallée du Niari et les Plateaux Batéké.

**MODIFICATIONS DE L'ETAT DES SOLS
DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU DE MBE-BATEKE
PAR SUITE DE LA MISE EN CULTURE MECANISEE**

«La correction de l'acidité est l'une des plus vieilles pratiques agricoles dans le monde» (CURTIN et SMILLIE, 1983).

Les situations retenues pour cette étude concernent, dans la Vallée du Niari et sur le plateau de Mbé, des zones à culture mécanisée du manioc, qui est l'aliment principal des congolais.

Sur le terrain, l'étude vise les réponses aux questions suivantes : à partir du sol de référence sous savane, quelles sont les modifications apportées par la mise en culture mécanisée ? Dans le sol sous culture, quels sont les effets des apports de calcaire ? Dans quel sens évoluent-ils ?

L'étude des transformations physico-chimiques des sols sous culture de manioc est longue (cycle végétatif de 24 mois) et nécessite une logistique importante et coûteuse. Ce travail est réalisé dans les expérimentations multifactorielles des projets FAC MANIOC et AGRISUD conduites respectivement à Mantsoumba (Vallée du Niari) et au PK 45 (plateau de Mbé-Batéké). Ces essais menés en dispositifs expérimentaux sont surtout conçus pour l'étude de la phytotechnie du manioc (effets de fertilisants et types de travail du sol sur les rendements).

En rapport avec l'objectif de ce travail, un choix de situations a été fait afin d'apprécier l'incidence de l'apport de calcaire - tel qu'il est pratiqué actuellement - sur l'acidité du sol, la CEC et les cations échangeables (y compris l'aluminium et le manganèse). Par ailleurs, étant donné que ces essais mettent souvent en place des jachères à *Pueraria* enfouies avant la culture de manioc, on s'attache aussi à en étudier l'incidence sur le statut organique des sols.

Après avoir fait le constat de la dégradation des sols sous culture, ce chapitre débouche sur la présentation des grandes orientations données à ce travail.

2.1. LOCALISATION ET CHOIX DES SITUATIONS ETUDIEES

Pour chacune des deux régions un site a été choisi :

- *Mantsoumba*, dans la Vallée du Niari, à 300 km à l'ouest de Brazzaville par la Route Nationale n° 1, avec pour coordonnées géographiques 4°10'S et 13°15'E.

- le lieu-dit «Km 45» ou «PK 45» sur le plateau de Mbé-Batéké, situé à 45 kilomètres au nord de Brazzaville par la Route Nationale n° 2. Il est situé à 3°50'S et 13°04'E.

Les sols de la zone de Mantsoumba peuvent être considérés comme représentatifs des sols ferrallitiques fortement désaturés argileux profonds (CPCS, 1967) des plateaux de la Vallée du Niari, abondamment décrits par les pédologues ORSTOM (BRUGIERE, 1953 ; DE BOISSEZON et *al*, 1969 ; MARTIN, 1970 ; DENIS, 1971 ; DENIS et RIEFFEL, 1975 ; JAMET, 1975 ; MARTIN, 1975). Ils sont classés dans les «Ferralsols jaunes» de la Légende FAO/UNESCO (1976) et les «Haplorthox» de la SOIL TAXONOMY (SOIL SURVEY STAFF, 1975) par MARTIN (1979) qui signale par ailleurs que «ces plateaux de la Vallée du Niari présentent un type de sols relativement homogènes».

Les sols du PK 45 sont également représentatifs des sols ferrallitiques du plateau de Mbé-Batéké où, sur ces surfaces relativement planes ou à faibles pentes, les variations morphologiques des sols ne portent que sur des caractères secondaires tels que l'épaisseur des horizons ou l'intensité de la couleur (DE BOISSEZON, 1965 ; DE LA SOUCHERE, 1974).

Sur ces deux sites , le système de culture est à base de manioc, plante réputée pour sa mauvaise réponse à la fumure minérale pour différentes raisons (endomycorhyzes, déséquilibre partie aérienne/racines, longueur du cycle). Il

semble cependant que le chaulage et l'apport d'azote aient en moyenne un effet bénéfique (ARRIVETS, 1988), ce qui justifie l'existence d'essais de fumure.

2.1.1. DANS LA VALLEE DU NIARI

A Mantsoumba, les problèmes agronomiques qui se posent au CAIEM concernent le maintien de la fertilité et l'expérimentation d'accompagnement est confiée au «Projet Manioc» du FAC (Fond d'Aide et de Coopération) intégré au «Programme National Manioc» du Congo (ARRIVETS, 1988).

Les essais, portant notamment sur des travaux culturaux et des fumures, ont lieu sur la parcelle n° 24 qui présente, après quinze ans de culture mécanisée intensive, un état de dégradation préoccupant.

Parmi ceux-ci, l'essai «Chaulage 89/91» teste, en conditions standard de grande culture, l'effet d'apports de calcaire sur la production du manioc ; l'objectif principal est la recherche de la solution «la plus économique» (doses, formes d'épandage).

Installé après une jachère cultivée de deux ans en *Pueraria javanica*, cet essai présente un dispositif expérimental comportant quatre blocs de Fisher. Chaque parcelle compte douze lignes de 80 m de long espacées de 1 m, avec des écartements de 1 m sur la ligne entre les pieds de manioc (densité de plantation 10 000 pieds à l'hectare).

Les doses de calcaire testées sont :

- 0, 400, 800 et 1600 kg ha⁻¹, en épandage uniforme, avec incorporation au sol à 10 cm de profondeur par un travail du sol aux disques légers,
- 400 kg ha⁻¹, localisés en rond autour des pieds de manioc, ce qui concernant 20% de la superficie cultivée, correspond à un apport cinq fois plus fort, équivalent à 2000 kg ha⁻¹.

Une fumure de fond est assurée par un apport localisé de NPK (100 kg ha⁻¹ d'urée + 100 kg ha⁻¹ de supertriple + 100 kg ha⁻¹ de chlorure de potassium) après la plantation.

Ce travail retient trois des six traitements de l'essai pour étudier l'effet de l'apport de calcaire :

- le témoin sans apport de calcaire (série d'échantillons NC0),
- l'apport uniforme d'une dose de 1600 kg ha⁻¹ de calcaire broyé (série NC16),

- l'apport localisé d'une dose équivalente à 2000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé (série NC20).

Les observations ont été faites six mois après plantation, en mai 1990 ; l'humidité du sol est homogène au sein d'un même prélèvement et proche de la capacité au champ.

2.1.2. SUR LE PLATEAU DE MBE-BATEKE

Au PK 45, sur les sols sableux du plateau de Mbé-Batéké, des exploitations modernes de 1,5 hectares de polyculture intensive à base de manioc sont installées par AGRISUD.

Le projet d'étude des systèmes de culture mené en recherche d'accompagnement présente un site adéquat pour l'observation de l'évolution de la fertilité de ces sols. Les essais factoriels sont très complexes car prenant en compte plusieurs facteurs à la fois : travail du sol, paillage (provenant de la végétation de savane ou de culture en couloir), compost ou fumier, amendement calcaire et fumure minérale.

Les parcelles d'essai sont disposées en trois blocs : A et B (mis en culture), C (laissé en friche et constituant actuellement la réserve d'herbes de savane pour le paillage). Chacun des blocs comporte six parcelles de 8 m x 50 m comprenant chacune 4 sous-parcelles groupées par paires et séparées par une bande fruitière. Chaque parcelle est délimitée par une haie vive de 1 m de large.

L'essai porte surtout sur l'étude de trois niveaux de travail du sol (culture mécanisée, culture attelée et travail minimum) avec et sans paillage.

Trois situations différentes sont retenues, dans cette étude, pour essayer d'apprécier les effets de l'apport de calcaire :

- B24 : 400 kg ha⁻¹ de calcaire épandu uniformément en début de culture, 300 kg ha⁻¹ de NPK (15-15-15), manioc récolté depuis deux semaines après 2 ans de culture ; sous-parcelle 22 ;
- B19 : 400 kg ha⁻¹ de calcaire épandu uniformément en début de culture, 300 kg ha⁻¹ de NPK (15-15-15), vieux manioc, planté en avril 1990 (âgé de 19 mois), sous-parcelle 7 ;
- B09 : équivalent de 400 kg ha⁻¹ de calcaire en début de culture,

(apport sur la ligne de plantation), 300 kg ha⁻¹ de NPK (15-15-15), manioc jeune, mars 1991 (9 mois), sous-parcelle 5.

Les prélèvements ont lieu en novembre 1991, en période humide comme pour les sols de la Vallée du Niari.

En définitive, bien que l'on note, sur chacun des deux sites, un cas où l'apport est «localisé», les situations retenues diffèrent surtout :

- pour Mantsoumba, après quinze années de culture intensive et mécanisée de manioc, par la dose apportée 6 mois avant le prélèvement.

- pour le PK 45, deux années après défrichage, par l'ancienneté de l'apport d'une dose identique, ancienneté liée à l'âge de la culture de manioc.

2.2. METHODES D'OBSERVATION, DE PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS ET D'ANALYSE UTILISEES

Les situations choisies sur les deux sites permettent d'évaluer les effets des pratiques culturales sur la correction de l'acidité du sol. Dans chaque cas, la prise en compte des témoins respectifs sous savane permet en outre de suivre les modifications dues à la mise en culture.

2.2.1. MORPHOLOGIE DES SOLS

Les transformations les plus facilement décelables au champ concernent la morphologie des sols.

Les modifications de la morphologie des sols sont appréciées par la comparaison des profils pédologiques et culturaux.

L'observation et la description macromorphologique de l'état du sol sous culture a fait appel à la méthode du profil cultural (MANICHON, 1982 ; DE BLIC, 1990).

La disposition des horizons du sol sur chacun des sites choisis oriente le prélèvement des échantillons effectué afin d'étudier au mieux les modifications des caractères physico-chimiques entraînées par la mise en culture mécanisée et les différents traitements réalisés.

2.2.2. PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS

Un rectangle de 20 m x 9 m est délimité en position centrale dans chacune des parcelles choisies dans l'essai du CAIEM, soit une surface utile de 180 m² (fig. 2.2-1).

creusée à la bêche, afin de s'assurer de la correspondance des horizons.

Les profondeurs de prélèvement choisies sont fonction des horizons du profil cultural (0 - 10, 10 - 20 et 20 - 30 cm, en surface) et de ceux du profil pédologique au-delà de 30 cm de profondeur.

Ces cinq prises ont été complétées par 20 prises à la bêche suivant un quadrillage de 2 m entre les lignes et de 4 m sur la ligne couvrant la totalité du rectangle central, ce qui permet d'avoir 25 prises élémentaires.

Dans le cas d'un apport de calcaire sur les lignes de plantation, les prélèvements sont réalisés le long de la ligne (dans les 20 cm autour du pied de manioc) ; chacun des prélèvements a son «homologue» dans l'interligne en vue d'étudier l'incidence du mode d'apport de calcaire sur le sol.

Les prélèvements élémentaires sont mélangés par horizon pour former une série d'échantillons «moyens» représentant la parcelle.

Au PK 45, les parcelles étant moins larges, le rectangle central délimité mesure 20 m x 6 m et le carroyage est fait avec des écartements de 1 m entre les lignes et de 4 m sur la ligne.

Cette méthode inspirée de JAMET (1975) BRAUDEAU (1984) et MAPANGUI (1992) est également appliquée sous végétation naturelle de savane afin de permettre des comparaisons pour des épaisseurs de sol identiques.

2.2.3. ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE

L'*analyse granulométrique* est effectuée par la méthode à la pipette de Robinson.

La *densité apparente* (d_a) est mesurée sur le terrain par la méthode au cylindre de 100 cm³ enfoncé horizontalement et le poids de terre est déterminé après séchage à 105 °C pendant 24 heures dans une étuve ventilée.

Les *mesures de pH* sont effectuées à l'aide d'un pH-mètre muni d'une électrode de verre ; la prise de terre est de 10 g et la suspension dans l'eau se fait avec un rapport sol/solution de 1/2,5. Pour le pH_{KCl} , une mesure de 1,86 g de KCl pur est ajoutée à la suspension préalablement obtenue pour le pH_{eau} et la mesure est effectuée après 30 minutes.

La *capacité d'échange cationique* et les *cations échangeables* du sol sont déterminés par la méthode «au chlorure de cobaltihexammine» (FALLAVIER et al, 1985), qui permet d'effectuer les mesures au pH du sol.

Le *carbone* et l'*azote* totaux sont dosés par combustion voie sèche à l'auto-analyseur *CHN 600 LECO*.

Le *phosphore labile* est extrait à froid par le fluorure d'ammonium et le bicarbonate de sodium; le dosage se fait par colorimétrie au bleu phosphomolybdique (méthode *OLSEN* modifiée par *DABIN*, 1965).

2.3. MODIFICATIONS DE LA MORPHOLOGIE DES SOLS

En dépit de l'épaisseur notable des sols, l'examen des deux premiers mètres des profils de sol permet généralement de donner des caractéristiques utiles pour leur mise en valeur.

2.3.1. SOL DE LA VALLEE DU NIARI

2.3.1.1. sous savane

La savane naturelle ayant disparu dans le périmètre du CAIEM, le profil de sol sous savane a été décrit sur le plateau de Tenzi, site du Projet IBSRAM 1, à environ 4 km de la parcelle n° 24 du CAIEM. Les espèces végétales présentes sont *Hyparrhenia diplandra* (en floraison, dépasse 2 m de haut), *Imperata cylindrica*, *Schizachirium platyphyllum* pour la strate herbacée et *Annona arenaria* et *Vitex madiensis* pour la strate arbustive.

Le profil observé, caractéristique des sols ferrallitiques de la zone, présente la succession des horizons suivants (fig. 2.3-1 et photo 3) :

0 - 8 cm : horizon A, noir (10 YR 2/2), humifère, frais, à texture argilo-limoneuse au toucher, structure grumeleuse et polyédrique très fine à fine, meuble, fragile ; racines fines abondantes, pores très nombreux, présence de lombrics, transition nette et régulière.

8 - 33 cm : horizon AB, brun foncé (10 YR 3/3), pénétration humifère uniforme, frais, texture argileuse, structure polyédrique subanguleuse fine à moyenne, peu compact, nombreuses racines et radicules réparties dans la masse, poreux, transition inférieure nette et régulière ; présence de nombreux nodules ferromanganiques.

33 - 70 cm : horizon B₂₁, brun jaunâtre (10 YR 5/8), pénétration humifère en traînées, frais, texture argileuse, structure massive à éclats polyédriques moyens à fins, compact à peu compact s'ameublissant vers le bas, poreux, racines fines peu nombreuses, nombreux nodules ferromanganiques, transition peu nette.

70 - 150 cm et plus : horizon B₂₂, jaune ocre (10 YR 7/6), frais, argileux, structure polyédrique fine à très fine, meuble, friable, poreux, absence de racines et d'activité biologique, présence à l'oeil nu de grains de sable quartzeux anguleux.

2.3.1.2. sous culture

La connaissance de l'itinéraire technique suivi et, mieux encore, de l'histoire culturelle des parcelles est très importante pour l'étude du profil cultural (MANICHON, 1982).

Dans le Niari, en pratique courante ancienne, après un rabattage de la jachère par disquage léger à partir du mois de février, le travail du sol se fait sans retournement avec des disques crantés lourds (*rome-plow*) allant à une profondeur de 25 cm ; deux ou trois passages de disques légers (*cover-crop*) sont réalisés ainsi qu'un apport de 1,5 t ha⁻¹ de calcaire broyé à l'épandeur d'engrais. Un rayonnage permet de matérialiser les lignes de plantation du manioc (TOUTOU-MISSIE, 1985).

Le compactage fréquent du sol ainsi travaillé (formation d'une « dalle » à 20 cm de profondeur) a nécessité une variante de cet itinéraire qui consiste à remplacer le *rome-plow* par un *chisel* qui défonce le sol jusqu'à une profondeur de 40 cm.

Actuellement, après rabattage ou girobroyage de la végétation (il s'agit de plus en plus d'une jachère cultivée en *Pueraria javanica* comme le montre la photo 5), on procède, lorsque le sol est encore assez humide (début de saison sèche) à un labour à la charrue à socs suivi de deux passages de disques légers (*cover-crop*) puis du rayonnage.

Sur le dispositif de l'essai «Chaulage», les opérations culturales suivantes ont été réalisées : girobroyage de la jachère à *Pueraria javanica*, labour à la charrue à socs, pulvérisage croisé (disques légers) puis passage de dents souples («canadiennes»).

Le profil cultural type, non différent selon les doses de calcaire reçues, présente une différenciation verticale bien marquée, avec un horizon cultural A_p subdivisé en deux couches (fig. 2.3-1) :

0 - 10 cm = Ap_1 : horizon de façons culturales superficielles fortement émietté, ameubli sous l'action de disques légers et de dents spiralées ; la terre fine est abondante mais on note la présence de quelques mottes centimétriques à faces de fragmentation rugueuses ; l'activité biologique est matérialisée par la présence de nombreux vers de terre ; la structure est polyédrique très fine, parfois soufflée ou bouillante aux pieds de manioc ; la transition avec l'horizon sous-jacent est très nette.

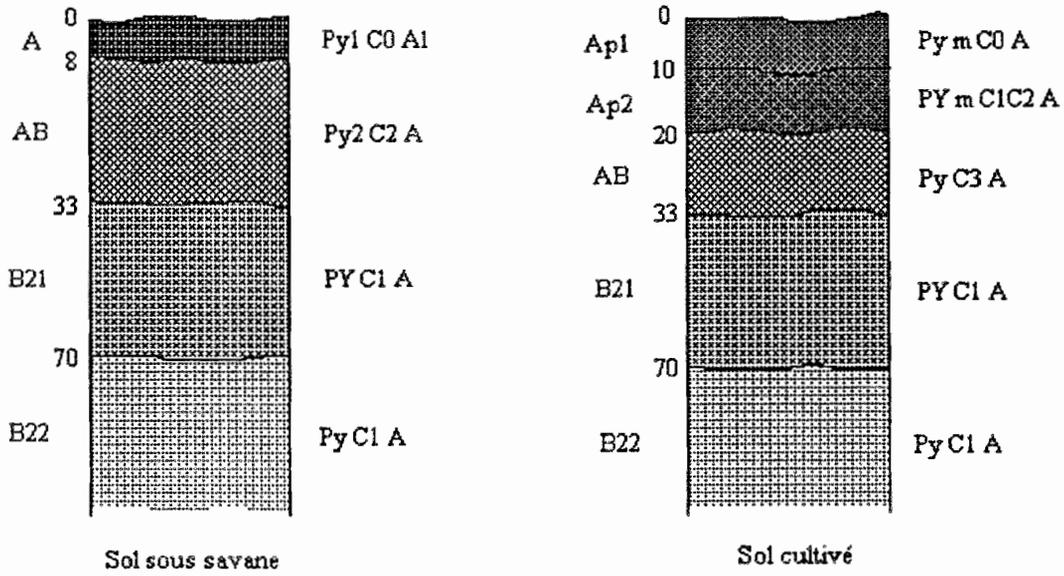
10 - 20 cm = Ap_2 : horizon travaillé profond, de texture argileuse, marqué par l'action de la charrue à socs. On note une différenciation latérale surimposée matérialisée par une alternance de bandes de labour en biais de couleurs brun clair (7,5 YR 5/4) et brun sombre (7,5 YR 3/2), essentiellement due au retournement des deux horizons pédologiques supérieurs par les socs ; structure grumeleuse à polyédrique moyenne ; la compacité est plus grande dans les bandes claires que dans les bandes sombres ; il n'y a pas de semelle de labour mais par endroits, on note la présence d'un lissage dû au glissement des socs de la charrue. On note la présence de quelques mottes décimétriques dans lesquelles les agrégats sont facilement discernable ; celles-ci apparaissent le plus souvent comme des reliques des précédents travaux du sol et on a pu vérifier qu'après une bonne pluie (10 mm) elles deviennent friables et s'écrasent entre le pouce et l'index.

Le travail du sol ayant été identique et uniforme sur toute la surface de l'essai, **la morphologie des sols sous culture ne diffère de celle du sol témoin sous savane que sur les vingt premiers centimètres.**

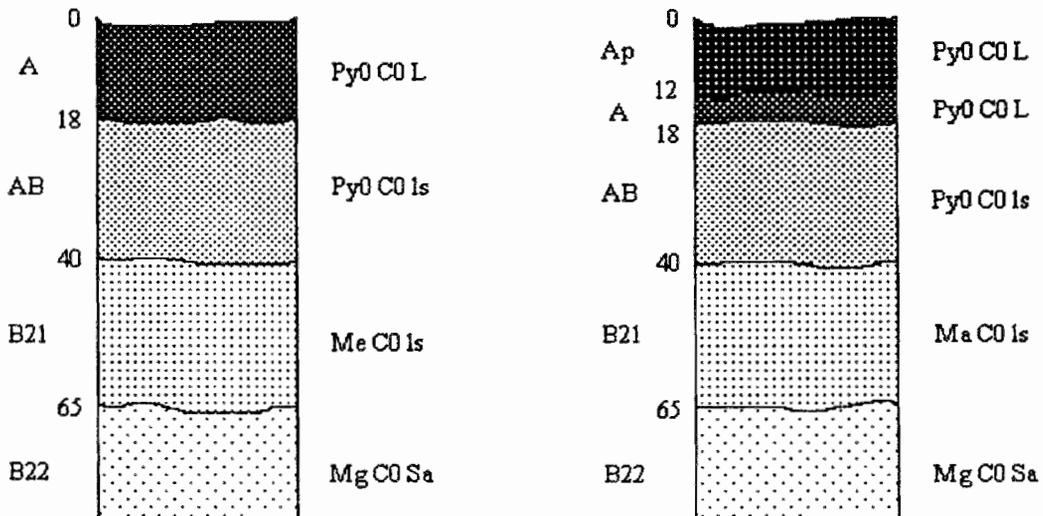
Les différences essentielles concernent l'apparition de mottes centimétriques, des traces de lissage par les outils de travail du sol et la densité radulaire amoindrie sous culture. En outre, les horizons Ap présentent une densité apparente plus élevée que l'horizon A (1,25 pour Ap_1 et 1,3 pour Ap_2 contre 0,9).

Au-delà, les horizons pédologiques se poursuivent par l'horizon de pénétration humifère en nappe (AB) coupé par les socs de la charrue (fig. 2.3-1).

1. Mantsoumba



2. Km 45

**Structure**

Py1 = polyédrique très fine
 Py2 = polyédrique fine
 Py0 = polyédrique peu nette
 PY = polyédrique moyenne
 m = mottes reliques (centimétriques)
 Me = massive à éclats émoussés
 Mg = massive à éclats moyens et grossiers

Compacité

C0 = compacité nulle (meuble)
 C1 = peu compact
 C2 = compact
 C3 = très compact

Texture

A (a) = argileux
 L (l) = limoneux
 S (s) = sableux

Figure 2.3-1 : Correspondance des horizons sous savane et sous culture de manioc à Mantsoumba (Vallée du Niari) et au PK 45 (plateau de Mbé-Batéké).

2.3.2. SOL DU PLATEAU DE MBE-BATEKE

2.3.2.1. sous savane

Les observations ont porté sur deux fosses ouvertes en novembre 1991, sous savane dans le «bloc C». La végétation herbacée à base d'*Hyparrhenia lecomtei* est fréquemment coupée et utilisée comme paillage dans les essais ; on note également la présence de *Smilax kraussiana* (Liliacée) ; la strate arbustive comprend *Hymenocardia acida* et quelques arbustes rabougris de *Annona arenaria*.

Le profil caractéristique de ce sol ferrallitique présente la succession des horizons suivante (fig. 2.3-1 et photo 4) :

- 0 - 18 cm : horizon A, humifère, humide, brun grisâtre très sombre (10 YR 3/2), meuble, texture sablo-limoneuse, à structure polyédrique subanguleuse peu nette à grumeleuse, fine à très fine, associée au chevelu radiculaire très dense, matière organique non directement décelable, pas d'éléments grossiers, rares poches de sables jaunâtres déliés, présence de charbons de bois, nombreux pores très fins (1 mm), présence de nombreux termites et lombrics, transition inférieure diffuse.
- 18 - 40 cm : horizon AB, homogène, de pénétration humifère en nappe, humide, poreux, brun grisâtre sombre (10 YR 3/3), texture limono-sableuse , structure polyédrique subanguleuse peu nette, nombreuses plages claires de sables nus, présence de termites, charbons de bois, nombreuses racines fines, transition diffuse.
- 40 - 65 cm : horizon B21, de couleur brun foncé (10 YR 4/3), hétérogène, pénétration humifère par traces et traînées verticales, texture limono-sableuse, structure massive à éclats émoussés, meuble, poreux, quelques racines graminéennes et ligneuses moyennes et fines, déviées, quelques termites, transition graduelle et ondulée.
- 65 - 120 cm : horizon minéral B22, de couleur jaune brunâtre (10 YR 6/6) à jaune (10 YR 7/6), quelques taches humifères irrégulières peu contrastées, sans éléments grossiers, texture sableuse , structure massive à éclats émoussés moyens et grossiers, meuble, poreux, racines fines peu nombreuses, rares galeries termitiques.

On remarque une pénétration humifère importante et profonde ainsi qu'une variation de la texture qui devient progressivement un peu plus argileuse avec la profondeur sans toutefois qu'il y ait une accumulation d'argile ni de sesquioxydes.

2.3.2.2. sous culture

Sur le site du projet AGRISUD, trois types de travail du sol sont conduits : labour au tracteur, labour à la traction animale et travail minimum.

En réalité, le tracteur n'a servi qu'à l'ouverture des terrains et tous les travaux se font à la houe. Ainsi, les profils culturaux observés ne diffèrent des profils sous savane que sur les 8 à 12 centimètres supérieurs où un horizon Ap se distingue de l'horizon A sous savane par la disparition du chevelu de racines graminéennes.



1



2



5



6



3



4

1 - Vallée du Niari : vue des essais «Chaulage» à droite et «Systèmes de culture» à gauche.

2 - Plateau de Mbé-Batéké : site d'essai AGRISUD au PK 45, avec, au fond, bananiers et brise-vents d'*Eucalyptus sp.*

3 - Vallée du Niari : profil de sol sous savane, plateau de Mantsoumba.

4 - Plateau de Mbé-Batéké : profil de sol sous savane, PK 45, site d'essai AGRISUD.

5 - Vallée du Niari, plateau de Mantsoumba : culture de manioc âgée de six mois, jouxtant une jachère à *Pueraria juvanica*.

6 - Vallée du Niari, plateau de Mantsoumba : jeune plantation de manioc envahie par le *Pueraria*, parcelle n°14 ; au fond, la savane à *Hypparhenia diplandra*.

2.4. MODIFICATION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS

Afin de mieux étudier les modifications des principales caractéristiques physico-chimiques des sols et leur évolution par suite de la mise en culture, une caractérisation préalable des sols sous savane est nécessaire et importante.

2.4.1. CARACTERISATION DES SOLS SOUS SAVANE

Les principales caractéristiques physico-chimiques des sols sous savane sont présentées dans les tableaux A2-1 et A2-2 en annexe et résumées sur la figure 2.4-1.

2.4.1.1. Caractéristiques physiques

La teneur en argile ($< 2 \mu\text{m}$) du sol du plateau de Mantsoumba augmente avec la profondeur, de 38% en surface à 73% à 150 cm. Les limons fins (2-20 μm) représentent moins de 30 % de la terre fine et les limons grossiers (20-50 μm) n'atteignent pas 8% sur l'ensemble du profil. Les taux de sables fins (50-200 μm), ne dépassent pas 20% en surface, et ne sont plus que de 7 % à 120 cm ; les sables grossiers (200-2000 μm) diminuent régulièrement avec la profondeur de 9 à 2 %.

La situation est inverse sur le plateau de Mbé-Batéké où le taux d'argile n'atteint pas 10% en surface et 4 % à 120 cm. Les taux de limons sont très faibles : 1 à 1,7 % dans les horizons de surface, et n'atteignent pas 4 % au-dessous de 30 cm profondeur (Cf tableau A2-2). Les fractions granulométriques les plus importantes sont celle des sables fins (50-200 μm) avec des taux voisins de 55 %, et celle des sables grossiers (de l'ordre de 32 %).

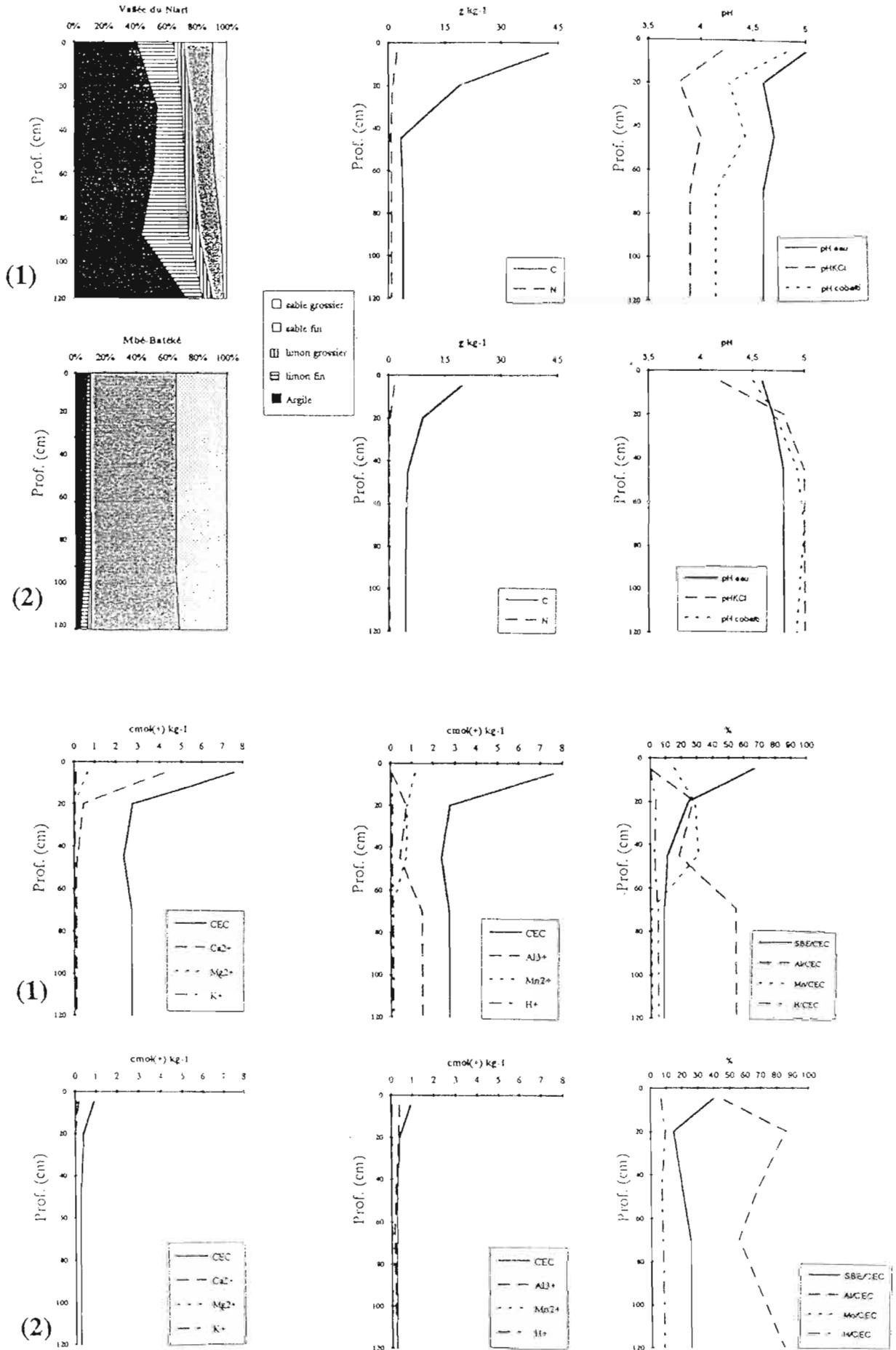


Figure 2.4-1 : Résumé comparatif des principales caractéristiques du sol de Mantsoumba (1) et du PK 45 (2).

Il s'agit bien, selon les triangles des textures (rectangle de l'INRA ou équilatéral de l'USDA) et comme il a été signalé précédemment, de sols représentant **deux pôles texturaux** bien contrastés, le premier étant **très argileux** (40 à 60 % d'argile) et le second **très sableux** (moins de 10 % d'argile).

La densité apparente est plus faible dans l'horizon humifère du sol du Niari ($d_a = 0,9$), que dans les horizons profonds où elle atteint 1,3 ; cela est probablement en relation avec le chevelu radicaire et l'activité biologique. Elle est plus élevée pour le sol sableux de Mbé où sont relevées des valeurs de 1,3 en surface et de 1,4 en profondeur.

Ces différences existant entre les deux sols rappellent les observations faites par HUMBEL (1987) qui note que les sols les plus pauvres en squelette quartzeux sont les plus poreux, en raison des phénomènes de microorganisation.

2.4.1.2. Caractéristiques physico-chimiques

2.4.1.2.1. Matière organique

Comme il a été signalé précédemment, la matière organique des sols est principalement issue de la décomposition du système radicaire de la végétation aussi bien herbacée qu'arbustive.

La perméabilité du substrat minéral induit cependant une évolution différente à travers le profil de sol : ainsi, la descente de la matière organique est plus importante au plateau de Mbé (jusqu'à 1 m) que dans la Vallée du Niari où elle reste dans les 10 à 30 premiers centimètres de sol.

Le sol de la Vallée du Niari présente un horizon humifère riche en matière organique (7 %). Cette teneur, qui diminue de moitié entre 20 et 30 cm (3,3% dans l'horizon AB), n'est plus que de 0,5 à 0,7 % au-delà de 35 cm de profondeur.

Sur le plateau de Mbé-Batéké, les teneurs en matière organique sont moins élevées que dans le Niari : 3,3% dans l'horizon humifère, 1,6% dans l'horizon AB et moins de 1% entre 30 et 120 cm de profondeur.

2.4.1.2.2. Acidité

Les valeurs de pH sont toutes inférieures à 5 (fig. 2.4-1). Il s'agit, selon le système de référence, **de sols acides** (R.P.F, 1992) ou de **sols très fortement acides** (SSSA, 1987).

Les sols sableux du plateau de Mbé sont nettement plus acides que ceux de la Vallée du Niari; les ΔpH sont toujours négatifs dans le sol de Mantsoumba, ce qui traduit une capacité d'échange cationique dominante, contrairement au sol du PK 45 dont les ΔpH s'annulent puis deviennent positifs en profondeur. Ces différences de comportement seront précisées dans l'étude de la réactivité du complexe d'échange.

2.4.1.2.3. Capacité d'échange et cations échangeables

Le sol sous savane de la Vallée du Niari, malgré ses teneurs en argile et matière organique, présente une faible capacité d'échange cationique qui n'est que de $7,6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ en surface. Cette CEC diminue de moitié dès que l'on passe de l'horizon humifère dans l'horizon AB sous-jacent.

Le calcium y est le cation échangeable dominant en surface (55% de la CEC), suivi du manganèse (16%), du magnésium (9%) et du potassium (2%), l'aluminium et le sodium n'occupant chacun que 1% de la CEC.

Bien que la teneur en manganèse échangeable baisse dans les horizons sous-jacents, le taux de saturation du complexe en cet élément reste constante (30%) avant de baisser brutalement à 1% à 1 m de profondeur.

Les teneurs en aluminium échangeable sont insignifiantes en surface ($0,08 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) mais atteignent $1,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ à 1 m de profondeur. Le taux de saturation du complexe en aluminium augmente avec la profondeur : de 1% en surface, elle passe à 20 à 30 % dans les horizons sous-jacents et atteint 55% à 1 m, profondeur où le calcium n'occupe plus que 5% de la CEC. Il en est de même des protons qui atteignent le même taux de saturation que le calcium à 1 m (5%).

Dans le **sol sous savane du plateau de Mbé-Batéké**, la CEC est très faible : moins de $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. Dès la surface, le complexe est dominé par l'aluminium qui occupe près de la moitié de la CEC (46%) tandis le calcium n'en occupe que 20%. Le manganèse échangeable est inexistant et, après le magnésium (9% de la CEC), ce sont les protons qui compensent le déficit de charges (7%) alors que le potassium et le sodium ne représentent chacun que 4% de la CEC.

En dehors de l'horizon humifère, les teneurs en cations alcalins et alcalino-terreux sont insignifiantes : Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^{+} ne dépassent pas $0,01 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ chacun. Seuls l'aluminium et les protons occupent le complexe d'échange. Les teneurs en aluminium échangeable diminuent avec la profondeur, mais la diminution parallèle de la CEC fait que les taux de saturation en aluminium se maintiennent à 86% entre 10 et 30 cm, 60% entre 30 et 65 cm et 56% à 1 m de profondeur.

On note que la capacité d'échange déterminée par la méthode à la cobaltihexammine est bien mesurée au pH du sol : la figure 2.4-1 montre en effet que le pH de la solution après contact avec le sol est compris entre pH_{eau} et pHKCl .

En définitive, il ressort que dans ces deux sols acides, de textures bien différentes, les valeurs de capacités d'échange sont en accord avec la nature minéralogique du complexe adsorbant, les teneurs en argile, les taux de matière organique et le pH. La matière organique est responsable d'une CEC plus élevée dans les horizons humifères.

Il s'agit, dans les deux cas, de sols ferrallitiques fortement désaturés en B, faiblement pourvus en cations alcalins et alcalino-terreux (fig. 2.4-1). Le potentiel de fertilité chimique est plus bas sur le plateau de Mbé-Batéké que dans la Vallée du Niari.

Ces résultats corroborent ceux déjà obtenus sur ces sols sous savane de plateau de la Vallée du Niari (MARTIN, 1975 ; NZILA, 1992 ; MAPANGUI, 1992) et de Mbé-Batéké (DE LA SOUCHERE, 1974).

L'importance de la garniture cationique du complexe adsorbant de l'horizon humifère diffère d'un sol à l'autre :

Mantsoumba : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+} = \text{Na}^+ > \text{H}^+$

PK 45 : $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{K}^+ = \text{Na}^+$

Au total, les taux de saturation du complexe adsorbant par les différents cations indiquent nettement qu'il y a un risque de toxicité :

- *manganique* pour les plantes cultivées dans le sol de la Vallée du Niari ; l'aluminium, sans doute complexé par la matière organique paraît peu échangeable dans les horizons superficiels,
- *aluminique* dans le sol du plateau de Mbé-Batéké.

Cette caractérisation physico-chimique des sols sous savane sert de référence pour la mise en évidence des modifications des sols liées à la mise culture d'une part, aux apports de calcaire broyé de Madingou destinés à corriger l'acidité des sols, d'autre part.

2.4.2. EVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURE DE MANIOC

Pour les traitements avec apport «localisé» (NC20 pour Mantsoumba et B09 et B19 pour PK 45), les résultats présentés concernent la ligne de plantation, l'interligne n'étant considérée que pour l'étude de l'hétérogénéité des mesures.

2.4.2.1. Granulométrie

L'étude de l'évolution physique du sol de la Vallée du Niari sous culture de manioc en mécanisé depuis quinze ans à Mantsoumba a fait l'objet de la thèse de MAPANGUI (1992).

Le présent travail ne revient que sur la question de la texture du sol qui présente un profil quasi-isoargileux sous culture mécanisée intensive de manioc (fig. 2.4-2).

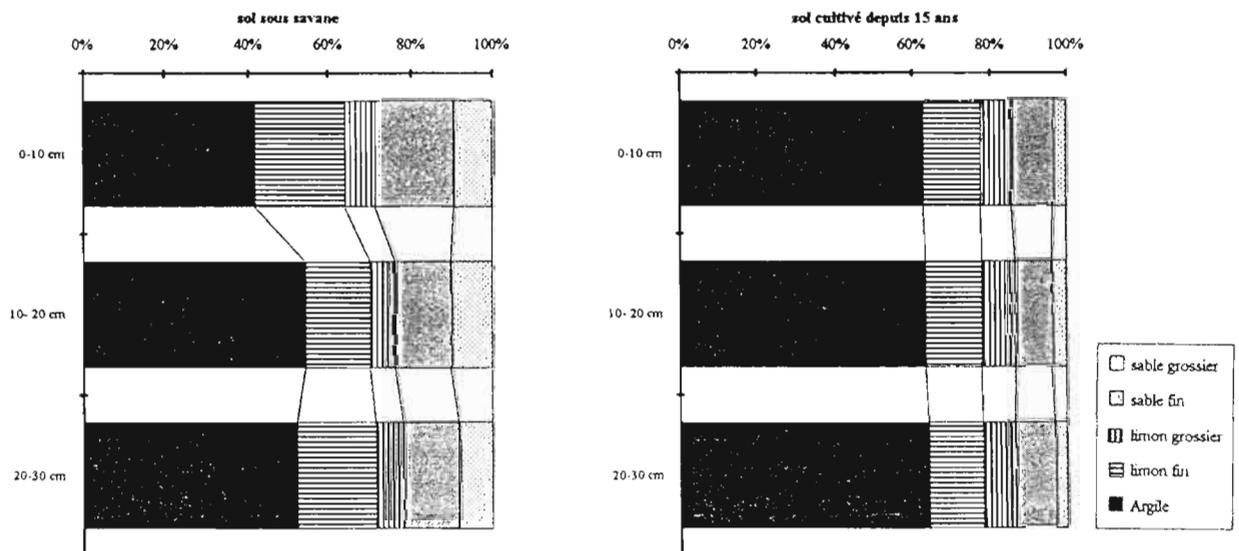


Figure 2.4-2 : Modification de la granulométrie de la terre fine à Mantsoumba (Vallée du Niari) après 15 années de culture mécanisée intensive de manioc.

La teneur en argile granulométrique dès la surface passe de 35% dans l'horizon A sous savane (NS1) à 60% en Ap₁ et de 45% en AB (NS2) à 56% en Ap₂. Même l'horizon B₂₁ passe de 36% à 62% en NC03. Les différences entre le sol sous savane et le sol cultivé s'estompent au-delà de 35 cm de profondeur.

Les raisons de cette modification ne sont pas évidentes et plusieurs hypothèses peuvent être émises.

Les travaux répétés du sol, notamment les décompactages profonds jusqu'à 40 cm couramment pratiqués antérieurement (TOUTOU-MISSIE, 1985), peuvent avoir entraîné, par mélange d'horizons, l'uniformisation des taux d'argile entre surface et profondeur dans le sol cultivé.

On peut évoquer en second lieu un artefact au cours de l'analyse mécanique de ces sols, dû à la dissociation difficile d'agrégats stables cimentés par les hydroxydes (Cf §2.1) et les colloïdes organiques du sol. Sous culture mécanisée, par suite de la destruction des ciments, ces agrégats se débiteraient en particules si fines qu'elles se retrouveraient isolées avec la fraction argileuse lors de l'analyse granulométrique. Cette hypothèse peut être étayée par les observations de DE BLIC (1989) qui note un affinement de la structure polyédrique nette, qui devient grumeleuse fine et polyédrique subanguleuse très fine, après une année, dans les parcelles labourées de l'essai IBSRAM I.

Une troisième hypothèse concerne l'activité faunique, notamment celle des termites, animaux fousseurs responsables d'une pédoturbation intense. Leur importance est telle dans les sols du Niari que MOREAU (1985) signale de nombreux nids hypogés à 40 cm de profondeur. L'espèce *Pseudacanthotermes militaris* est particulièrement abondante et domine le biotope sous culture mécanisée de manioc dans la Vallée du Niari. Lucifuges, les termites de cette espèce construisent des placages argileux à la surface du sol pour s'abriter des rayons du soleil lors de la récolte. Leur présence est prédominante pendant les mois qui suivent l'enfouissement de matériau organique dans les parcelles cultivées ; ces termites champignonnistes découpent les fragments végétaux qu'ils descendent dans leurs nids souterrains où ils édifient des meules à champignon (GARNIER-ZARLI, communication personnelle). Le comportement particulier de cette espèce (brassage par consommation des débris végétaux et construction de placages argileux) permet de penser qu'elle occasionne des remontées d'argile se traduisant à la longue par le profil granulométrique observé dans les sols cultivés de la Vallée du Niari. Ce rôle des termites est d'autant plus à prendre en

considération que la formation des microagrégats organo-minéraux dans leur fèces a été mise en évidence (GARNIER-SILLAM *et al*, 1985).

2.4.2.2. Matière organique et phosphore

2.4.2.2.1. Matière organique

La **matière organique** du sol constitue une source d'éléments nutritifs pour les plantes cultivées et améliore la structure du sol. Elle contribue donc à la productivité du sol et un niveau trop bas est un facteur limitant de la croissance des plantes et de dégradation physique des sols.

Dans le **Niari**, on note au bout de quinze ans de culture mécanisée intensive, une diminution de moitié des taux de matière organique de l'horizon 0-10 cm, de 5 à 2,5 % (fig. 2.4-3). Les trois doses de calcaire broyé de Madingou apportées à ces sols n'ont pas, au bout de six mois, d'effet notable sur les taux de matière organique dans la couche de surface (0-10 cm).

Dans la couche sous-jacente (10-20 cm), les apports de calcaire permettent le maintien de ces taux au même niveau que sous savane.

Le même constat a été fait par la plupart des auteurs ayant travaillé dans le Niari (MAUMON et GRIVEAU, 1968 ; MARTIN, 1970). Cette baisse du stock organique traduit une dégradation des sols par la mise en culture.

Sur le **plateau de Mbé-Batéké**, les taux de matière organique du sol diminuent en fonction de l'ancienneté de la culture de manioc. En surface, ces taux de l'ordre de 3,3 % sous savane ne sont pratiquement pas modifiés 9 mois après l'épandage de calcaire (B09), tandis qu'ils s'abaissent à 2,9 % après 19 mois et 2,3 % au bout de 24 mois (fig. 2.4-3). Dans l'horizon sous-jacent, on note par contre une certaine amélioration du niveau organique, avec des taux qui passent de 1,3 % sous savane (BS) à 2 % dans les cas des épandages les plus récents (B09 et B19).

2.4.2.2.2. Phosphore labile

La figure 2.4-4 montre que **dans la Vallée du Niari**, les profils de phosphore ont la même allure que ceux du carbone. Les teneurs en phosphore de l'horizon supérieur du sol sous savane (175 mg kg⁻¹) diminuent de moitié dans les sols sous culture (86 mg kg⁻¹). Les apports de calcaire n'ont cependant pas d'effet marqué : 87 mg kg⁻¹ pour la dose de 1600 kg ha⁻¹ (NC16) et 74 mg kg⁻¹ pour celle

de 2000 kg ha⁻¹ (NC20). Comme pour le carbone, on note une relative amélioration dans la couche sous-jacente (10-20 cm) ; cela est vraisemblablement dû aux apports de phosphore sous des formes très solubles, notamment le supertriple. Ces différences, qui s'estompent en profondeur, ne sont apparemment dues qu'aux pratiques culturales, en particulier la fertilisation réalisée.

Dans le **sol sableux du plateau de Mbé**, les teneurs en phosphore de l'horizon de surface sous savane (197 mg kg⁻¹) ne sont pas très différentes de celles de la jeune plantation (B09). Ces teneurs atteignent 206 et 225 mg kg⁻¹ respectivement après 24 et 19 mois.

La dynamique de cet élément est originale et les résultats obtenus ne peuvent être expliqués simplement. Les phénomènes de lixiviation marquant peu le phosphore, la diminution des teneurs observée dans le cas du Niari peut être attribuées à des différences de prélèvement par la culture de manioc suivant l'apport de calcaire ; cette hypothèse est en accord avec les résultats de DZABA (1987) qui observe un effet mobilisateur du calcaire broyé de Madingou sur les ions phosphoriques. Les processus de rétrogradation du phosphore peuvent également être évoqués : en effet, le phosphore apporté ne subsiste pas toujours sous des formes assimilables pour les plantes. Ce pouvoir fixateur est en grande partie dû à des phénomènes de sorption à la surface des hydroxydes de fer et d'aluminium, suivis éventuellement de précipitation sous forme de phosphates de fer et d'aluminium. Trois facteurs influencent essentiellement ces processus :

- le pH : la fixation est d'autant plus facile que le pH est bas ;
- la matière organique : la fixation est d'autant plus faible que le taux de matière organique est important ;
- et le degré de cristallisation des oxydes : la fixation concerne surtout les substances mal cristallisées ; les liaisons phosphore-oxyhydroxydes se font par adsorption chimique avec soit substitution d'ions OH⁻ de l'hydroxyde métallique par H₂PO₄⁻, soit cassure des ponts oxhydriles qui relient deux atomes d'aluminium du type >Al-O-Al< (BOYER (1982)).

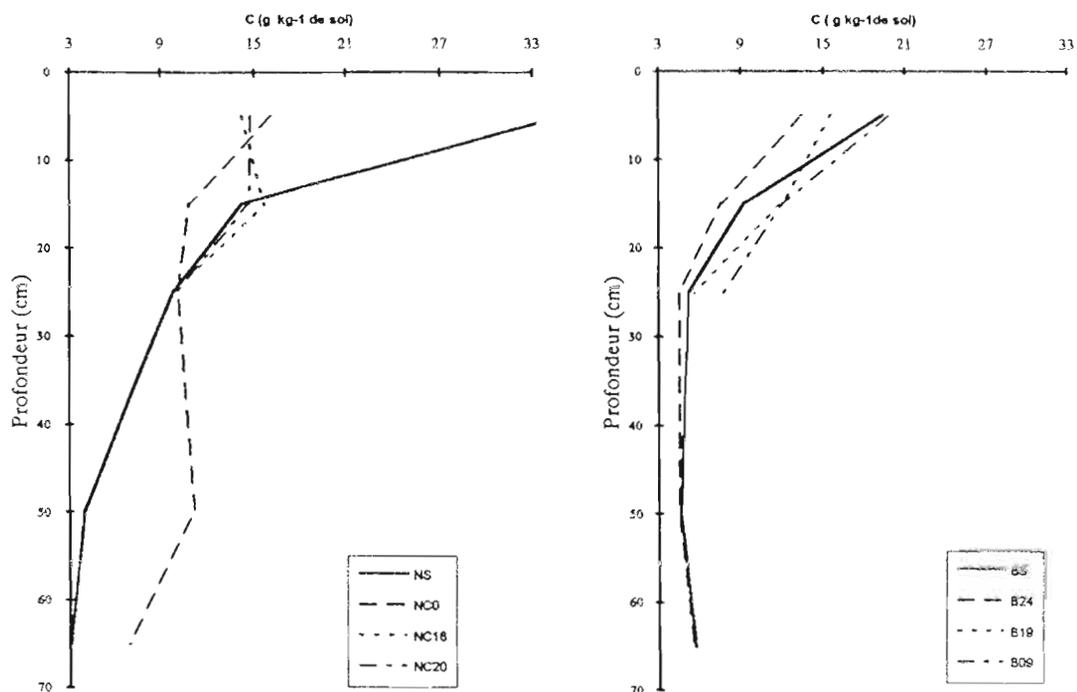


Figure 2.4-3 : Variation des teneurs en carbone total dans les sols sous savane et sous culture.

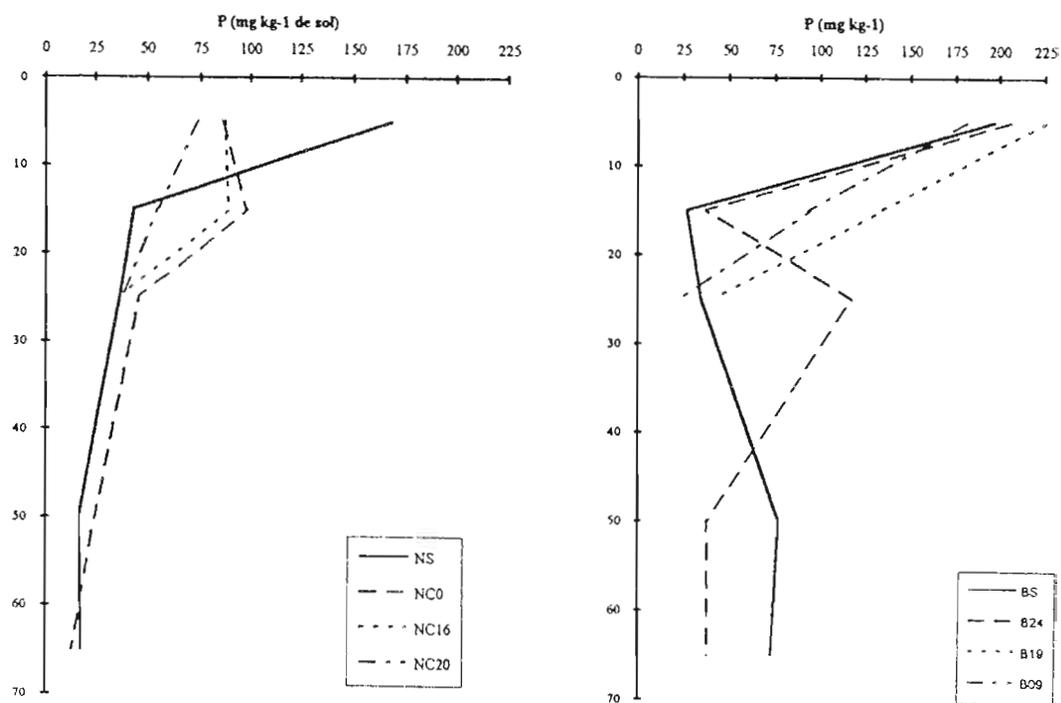


Figure 2.4-4 : Disponibilité comparée du phosphore labile OLSEN-DABIN entre savane et culture dans la Vallée du Niari et sur le plateau de Mbé-Batéké.

2.4.2.3. Acidité du sol

Dans tous les sols cultivés sans apport de calcaire, on observe une baisse d'au moins 0,5 unité pH par rapport au témoin sous savane.

Les mesures de pH_{eau} et pH_{KCl} réalisées montrent que les variations importantes du pH concernent surtout les horizons supérieurs (fig. 2.4-5).

Dans la **Vallée du Niari**, il y a une nette acidification pour le témoin sans apport de calcaire (NC0) : le pH_{eau} baisse de 5 sous savane à 4,4 dans l'horizon de surface et de 4,7 à 4,4 dans l'horizon sous-jacent (fig. 2.4-5).

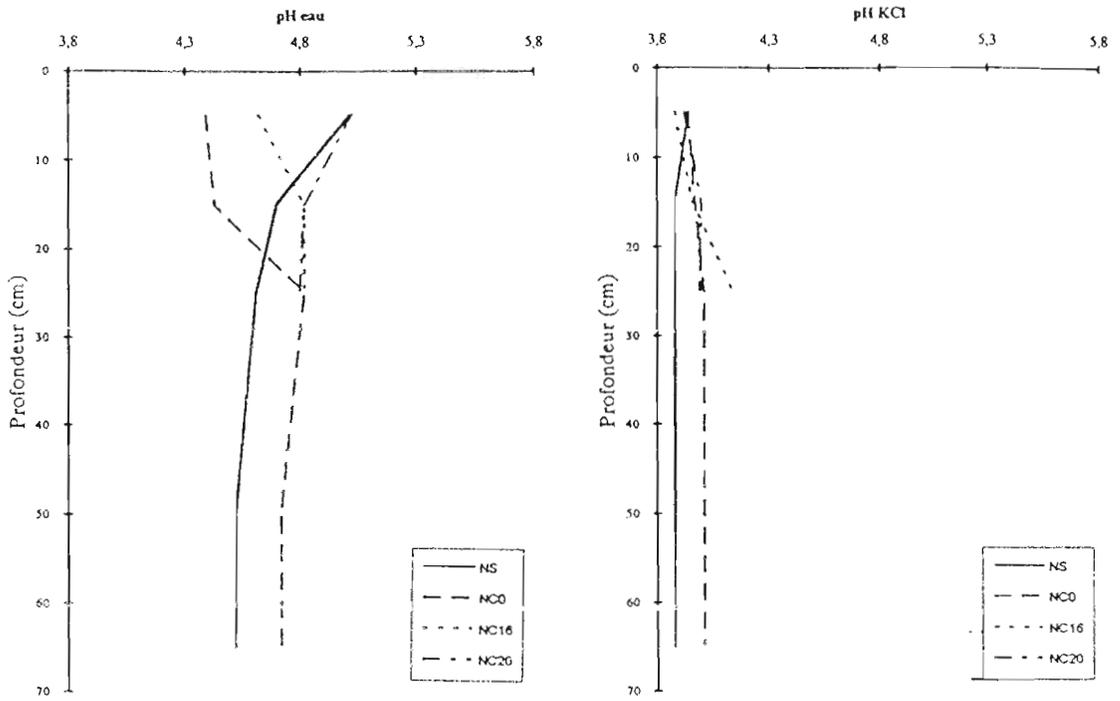
Les valeurs de pH_{KCl} , identiques en surface entre sols sous savane et sous culture, ne varient pas de plus de 0,1 unité sur l'ensemble du profil. Les doses utilisées ne relèvent pas le pH_{eau} de façon substantielle ; seule l'application de la dose de 2 t ha^{-1} «en localisé» permet de remonter le pH au niveau de celui du sol sous savane.

Les valeurs du paramètre $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{eau}}$ sont toujours négatives, malgré leur diminution en valeur absolue dans les sols cultivés. Ceci indique que la rétention des cations diminue fortement sous culture, même si elle ne s'annule jamais. La conséquence en est une possibilité d'augmentation de la lixiviation des cations et, partant, un appauvrissement inéluctable du sol.

Sur le **plateau de Mbé**, la mise en culture a entraîné des perturbations de pH particulières. A partir du sol sous savane (pH 5,2), l'apport de calcaire entraîne dans tous les cas une augmentation du pH_{eau} dans l'horizon de surface, de l'ordre de 0,2 à 0,6 unité. L'acidification n'est manifeste qu'à partir de 10 cm de profondeur.

La figure 2.4-5 révèle des valeurs pH_{KCl} supérieures à celles obtenues sous savane. Les valeurs de ΔpH très faibles, nulles ou positives suggèrent que ces sols sont proches du «point de charge nulle». A ces valeurs de pH, le complexe adsorbant de ce sol aurait donc tendance à développer des charges positives au détriment d'une capacité d'échange cationique. Les conséquences, très graves, en sont l'absence de rétention des cations d'importance agronomique, donc la perte par lixiviation des nutriments apportés par les engrais et, inversement, une forte fixation d'anions et en particulier une rétrogradation possible du phosphore.

1. sols de Vallée du Niari



2. sols de Mbé-Batéké

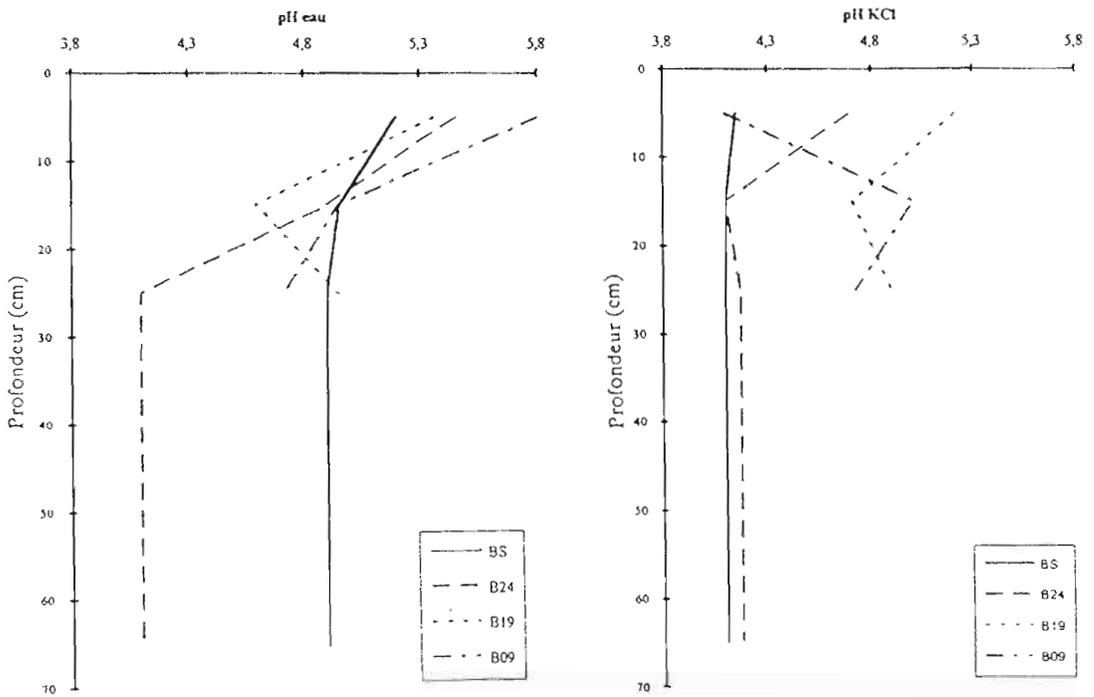


Figure 2.4-5 : Modifications du pH du sol par la mise en culture et les apports de calcaire selon les situations étudiées.

Les profils de pH_{eau} indiquent une mobilité relative de l'alcalinité induite par le calcaire apporté, liées probablement à un entraînement en profondeur par les eaux de drainage. Des résultats analogues ont été rapportés par WHITTEN *et al* (1993) pour deux sols de l'Ouest australien. Cette observation est moins vraie sur le plateau de Mbé-Batéké en raison sûrement de la faiblesse des doses apportées. Cela rejoint les conclusions de ces mêmes auteurs qui estiment, après 70 années de recherches au champ, qu'il est pratiquement impossible de prédire l'efficacité du contrôle de l'acidité des horizons de profondeur par des apports de calcaire réalisés en surface.

2.4.2.4. Complexe adsorbant

2.4.2.4.1. Capacité d'échange cationique

Comme pour le pH , les fluctuations les plus importantes n'intéressent que les horizons supérieurs (fig. 2.4-6).

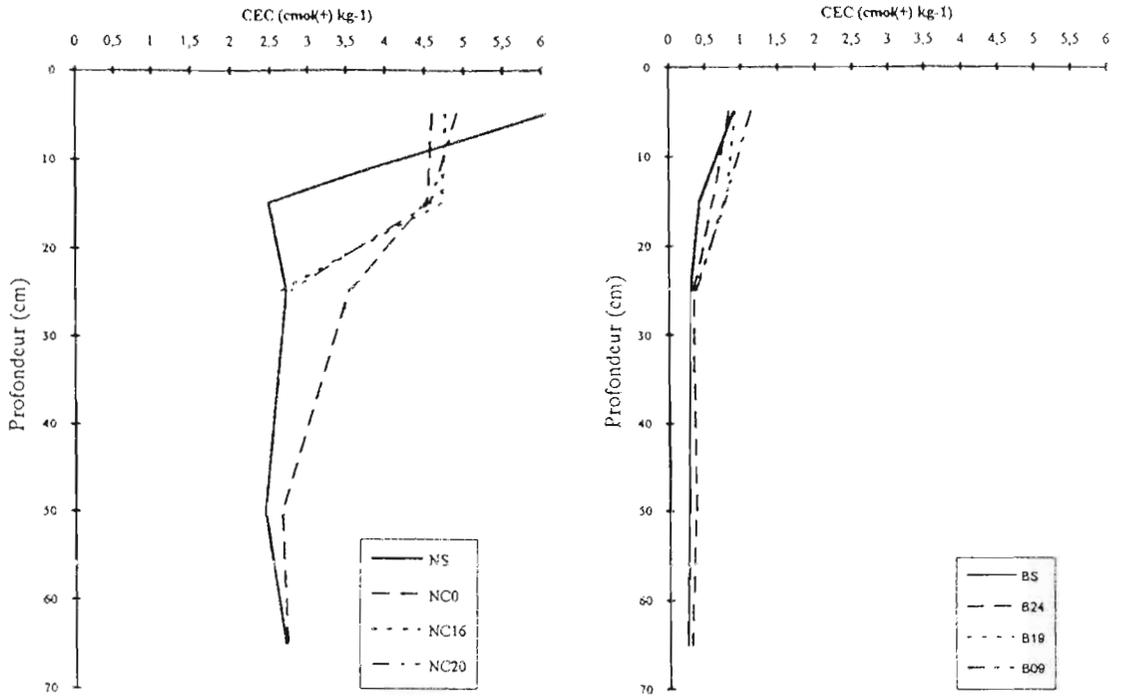
Dans le **sol du Niari**, sous culture de manioc (NC0), la CEC est de $4,6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dans la couche 0-10 cm, contre $7 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ sous savane (NS). L'apport de calcaire n'augmente que légèrement la CEC : 4,8 et 4,9 respectivement pour NC16 et NC20. Dans la couche 10-20 cm, on note la même amélioration que pour la matière organique, avec une CEC qui augmente de 2,5 à $4,6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$.

Ce phénomène est également noté pour le **sol du plateau de Mbé-Batéké** où les valeurs de CEC se maintiennent en surface autour de $0,9 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$; cela peut s'expliquer par les faibles fluctuations du pH et des taux de matière organique du sol.

2.4.2.4.2. Cations

Les courbes des teneurs en calcium sont identiques à celles des CEC ; ceci s'explique en partie par le fait que la méthode utilisée permet la mesure de la capacité d'échange au pH du sol qui tient compte de la somme des cations échangeables ; dans le cas présent, l'augmentation de la CEC est surtout en rapport avec celle du calcium échangeable.

1. Capacité d'échange cationique



2. Taux de saturation en cations basiques

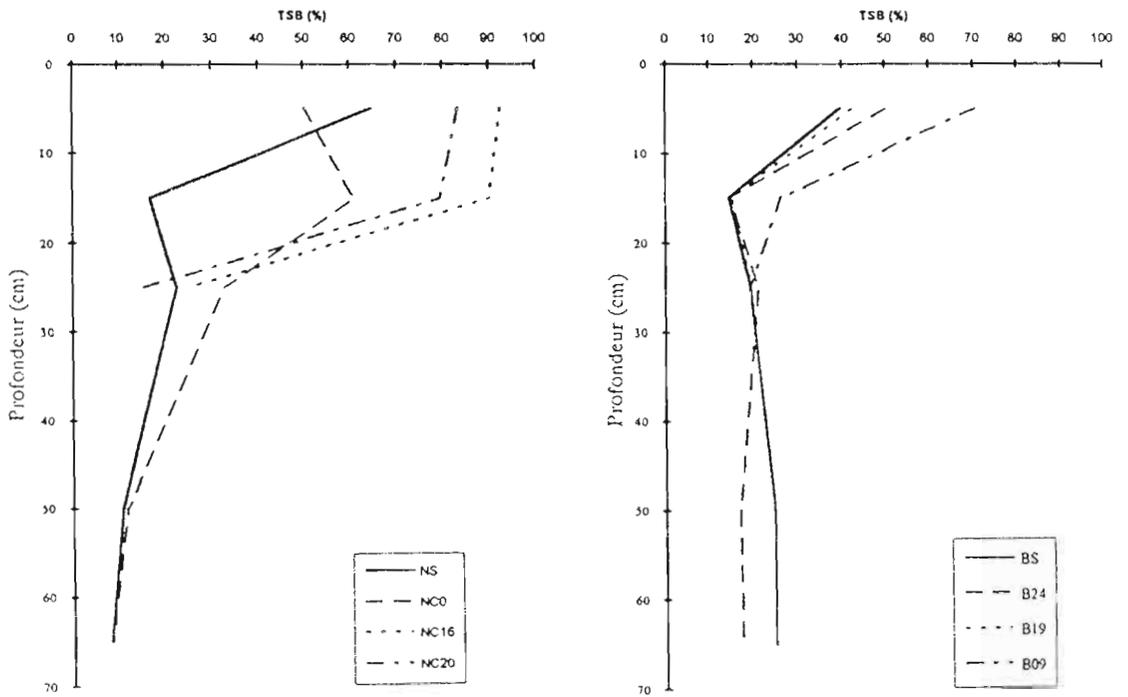
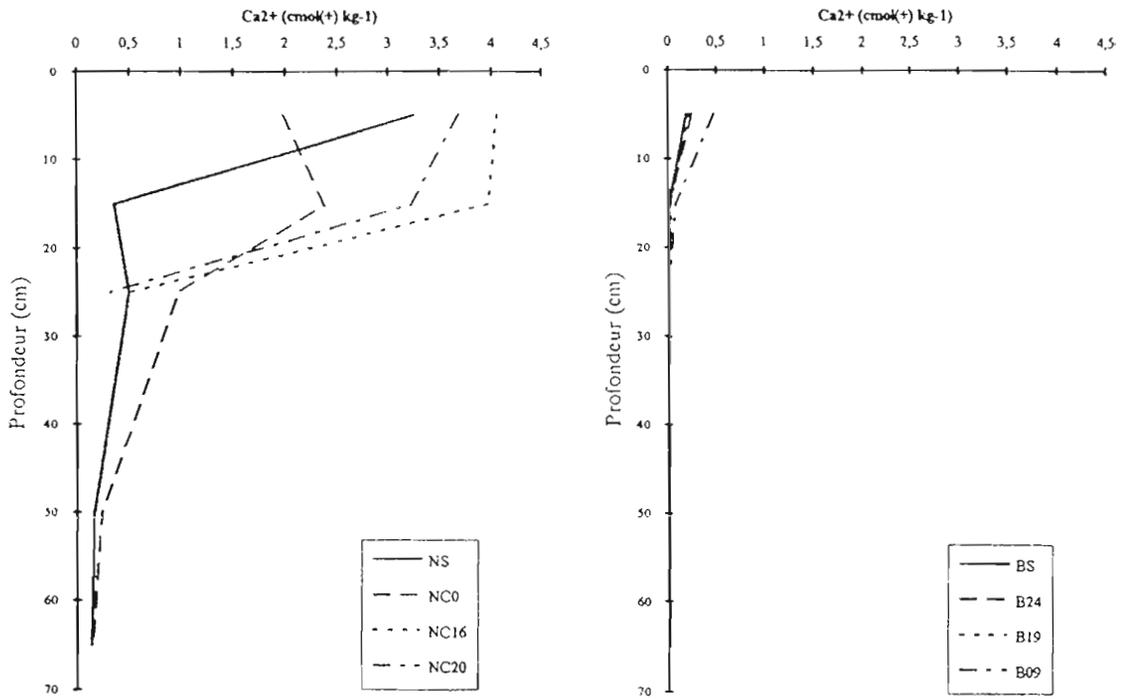


Figure 2.4-6 : Effets de la mise en culture et des différentes modalités sur le complexe d'échange.

1. Calcium échangeable



2. Aluminium échangeable

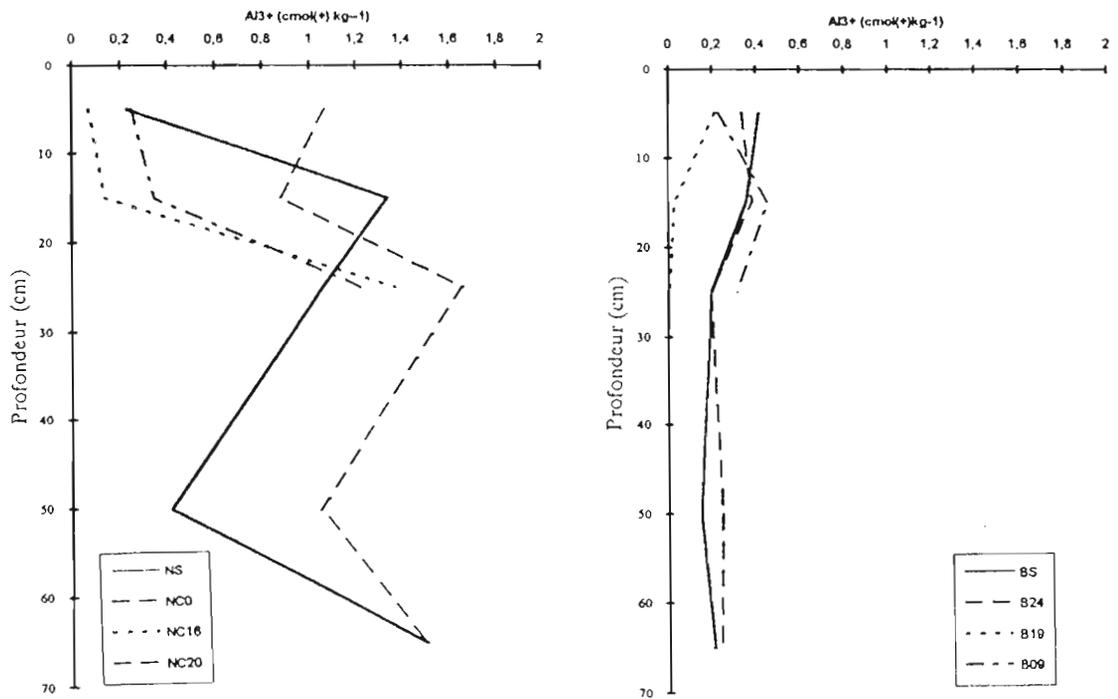


Figure 2.4-7 : Effets de la mise en culture et des différentes modalités sur le calcium et l'aluminium échangeables

Les teneurs en calcium évoluent en sens inverse de celles en aluminium (fig. 2.4-7). Ces dernières augmentent avec la profondeur, l'aluminium étant vraisemblablement fixé par la matière organique en surface. On note une nette augmentation de l'aluminium échangeable dans le sol de la Vallée du Niari cultivé sans apport de calcaire. Celle-ci semble en rapport avec la diminution de la teneur en matière organique (fig. 2.4-3) et la baisse du pH (fig. 2.4-5). Sous culture, l'apport de calcaire abaisse ces teneurs, car Al^{3+} est soit complexé par la matière organique, soit rendu moins soluble par élévation du pH.

2.4.2.4.3. Taux de saturation

Dans le **sol du Niari**, les taux de saturation du complexe en cations alcalins et alcalino-terreux sont plus faibles dans la couche 0-10 cm des sols cultivés (50% pour NC0 contre 65% pour NS). Ces taux sont relevés par l'apport de calcaire broyé (93% et 83% respectivement pour NC16 et NC20). Cette amélioration se maintient dans la couche 10-20 cm, puis les différences s'estompent dans les horizons pédologiques sous-jacents.

Dans le **sol du plateau de Mbé-Batéké**, par contre, on note en surface une bonification des taux de saturation en cations basiques (TSB) : de 40% sous savane ceux-ci passent, dans les sols cultivés, à 50% (B24), 42% (B19) et surtout 71% dans la plus jeune plantation (B09). Dans la couche 10-20 cm, à l'exception de la jeune plantation (B09) où le TSB atteint 26%, aucune différence n'est notée et les TSB sont de 15% en moyenne. En profondeur, le TSB plus faible sous vieille culture de manioc (B24) que sous savane traduirait la lixiviation des cations basiques consécutives à la dénudation du sol.

2.4.2.5. Hétérogénéité des effets du calcaire sur le pH

Comme il est signalé au §2.1, des apports dits «localisés» sont réalisés dans certains traitements testés dans les essais. Ce type d'apport concerne la dose de 2000 kg ha⁻¹ dans la Vallée du Niari et les épandages réalisés sur les cultures de manioc âgées de 9 et 19 mois sur le plateau de Mbé. On se limite ici à examiner l'importance de la localisation des apports sur la variabilité du pH, ce qui donne une idée de la mobilité du calcaire ainsi apporté.

Au **Niari**, les résultats montrent un effet sensible de la localisation de l'apport de calcaire sur le pH_{eau} (fig. 2.4-8). La différence entre le point d'apport et le reste du sol atteint 0,60 et 0,40 unité pH, respectivement dans les couches 0-

10 et 10-20 cm, mais devient nulle au-delà de 20 cm de profondeur. Aucune différence n'apparaît cependant pour les valeurs du pH_{KCl} (fig. 2.4-8) : il en résulte des valeurs de $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{eau}}$ plus élevées (en valeur absolue) dans les zones ayant reçu le calcaire broyé, comme le montre le tableau 2.4-1.

Sur le **plateau de Mbé**, les valeurs de pH obtenues présentent également une variabilité ligne - interligne due à l'apport de calcaire localisé sur la raie de plantation (fig. 2.4-8). Le sol s'acidifie nettement dans les interlignes n'ayant pas reçu le calcaire ($\text{pH} = 4,3$ contre $5,2$ sous savane et $5,3$ à $5,8$ sur la ligne de plantation). Les écarts de pH ligne-interligne évoluent avec l'ancienneté de l'épandage. En surface (0-10 cm), cet écart est de 1,4 unité pH dans la jeune plantation (9 mois) mais n'est plus que d'une unité dans celle de 19 mois. Par contre entre 20 et 30 cm de profondeur, l'écart est de 0,5 unité pH dans la jeune plantation et d'une unité pH dans celle de 19 mois.

Dans les deux plantations cependant, ces écarts sont atténués entre 10 et 20 cm de profondeur (0,50 à 0,70 unité pH).

Les valeurs de $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{eau}}$ obtenues sont présentées dans le tableau 2.4-1, en regard du pH_{eau} correspondant.

Tableau 2.4-1 : Profils comparés de pH_{eau} et de ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{eau}}$) entre l'apport localisé et l'interligne (IL) dans la Vallée du Niari (NC20) et sur le plateau de Mbé-Batéké (B19 et B09).

Profond. (cm)	pH_{eau} (ΔpH)					
	NC20	NC20IL	B19	B19IL	B09	B09IL
0-10	5,02 (-1,14)	4,41 (-0,49)	5,36 (-0,15)	4,41 (-0,31)	5,8 (-1,70)	4,38 (-0,37)
10-20	4,82 (-0,82)	4,42 (-0,42)	4,6 (+0,11)	4,10 (0,00)	4,95 (+0,06)	4,25 (-0,24)
20-30	4,8 (-0,80)	4,82 (-0,83)	4,95 (-0,05)	4,10 (+0,07)	4,72 (0,00)	4,20 (+0,52)

Les valeurs entre parenthèses (ΔpH) donnent une idée de l'importance et du signe de la charge du complexe.

Dans le sol du Niari, la charge du complexe reste négative malgré la diminution des ΔpH dans l'interligne. Le sol du plateau de Mbé-Batéké présente, par contre, une inversion du signe de la charge dans certains cas, comme cela a été indiqué lors de l'examen des résultats concernant le pH.

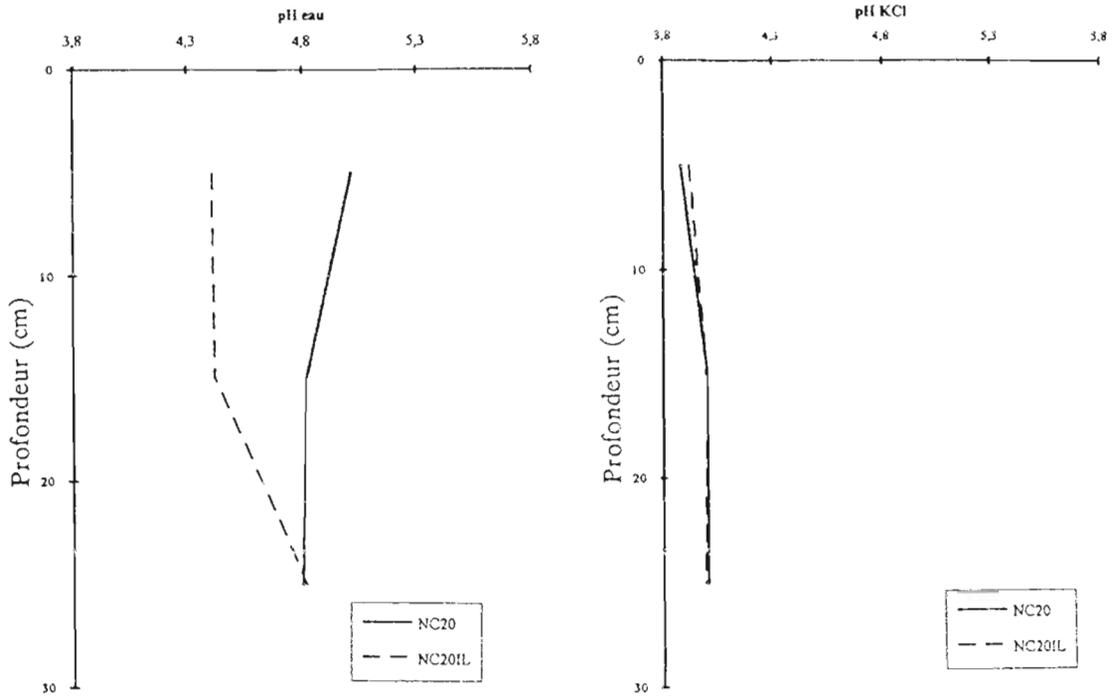
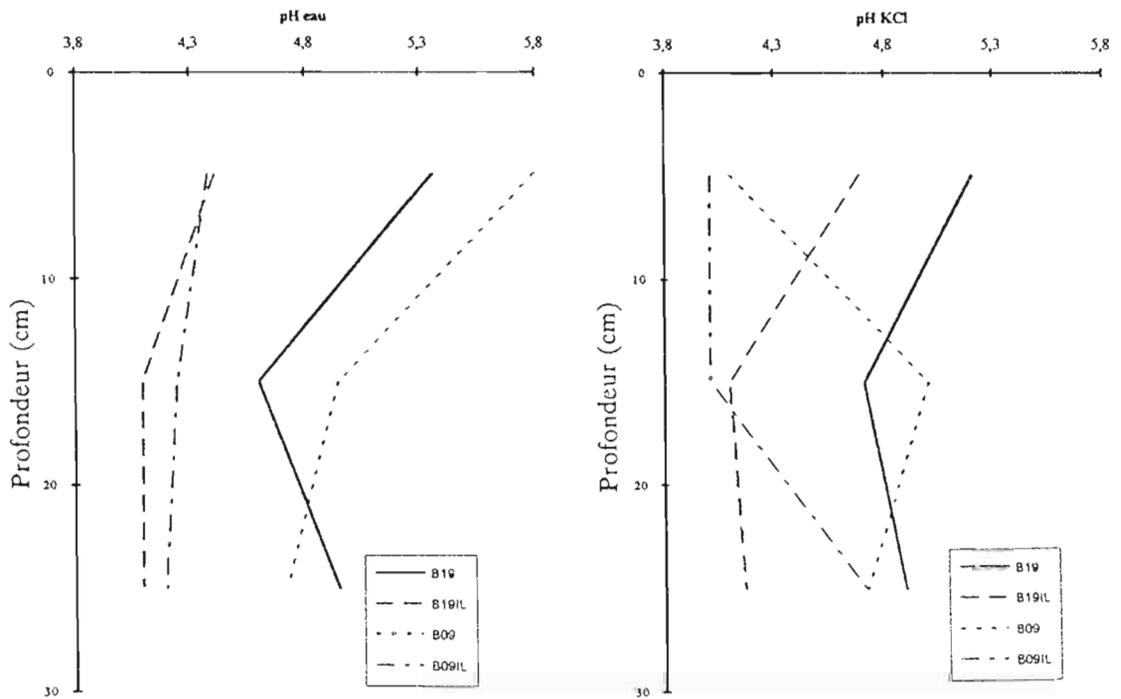
1. sol du Niari, 2 t ha⁻¹ en localisé (NC20)2. sol de Mbé-Batéké, avec 400 kg ha⁻¹ sur la ligne, 9 mois (B09) et 19 mois (B19) après épandage

Figure 2.4-8 : Profils de pH comparés, pour différents apports de calcaire broyé, entre la ligne et l'interligne (IL).

Les apports localisés de superphosphate peuvent en être la cause. En effet, cet engrais, obtenu par traitement du phosphate tricalcique par l'acide sulfurique peut contenir des impuretés de soufre dont le rôle acidifiant a été énoncé plus haut (Cf §1.1). En outre, la fertilisation phosphatée influence, comme il sera examiné dans le deuxième chapitre de ce mémoire, les charges variables du sol (UEHARA et GILLMAN, 1980 ; FALLAVIER, 1985).

Ces résultats indiquent l'existence d'une migration verticale de l'alcalinité induite par l'apport de calcaire broyé dans le sol. Même si cette migration verticale est limitée aux horizons superficiels, elle se conçoit bien dans ce contexte de drainage intense dû à la pluviosité élevée et la porosité suffisante des matériaux, comme il a été signalé dans l'examen des cadres naturels de cette étude. Par contre, la migration latérale du calcaire broyé est quasi-inexistante dans le sol.

2.5. DISCUSSION : LES GRANDS AXES DE LA RECHERCHE EFFECTUEE

Les deux premiers chapitres avaient pour objet de présenter la réalité de l'acidité des sols étudiés et de son aggravation sous culture mécanisée intensive. Ces sols ferrallitiques fortement désaturés, caractéristiques des régions humides équatoriales et subéquatoriales, sont acides ($\text{pH} < 5,5$) et chimiquement pauvres. Malgré cette pauvreté chimique, la végétation naturelle initiale paraît essentiellement vivre de ses propres restitutions en utilisant les éléments minéraux contenus dans la litière et les premiers centimètres du sol.

Le constat réalisé sur les sols des essais retenus pour la Vallée du Niari et le plateau de Mbé-Batéké, montre que cet équilibre pédo-bioclimatique existant sous savane est rompu dès la mise en culture. La comparaison des différentes situations culturales avec les sols de référence sous savane montre une évolution sensible des caractères physico-chimiques des sols.

Les premières investigations dans le Niari, rapportées par ailleurs dans «Quinze ans de travaux et de recherche dans les pays du Niari» (synthèse générale

par MAUMON et GRIVEAU, 1968), ont indiqué une évolution des sols sous le triple aspect chimique (acidité, cations échangeables), physique (structure) et biologique (matière organique).

La diminution des taux de matière organique sous culture a notamment été mise en parallèle avec la dégradation sous culture et la baisse du potentiel biologique (COMBEAU et QUANTIN, 1963 ; MOREAU, 1978). La cause majeure évoquée est l'augmentation de la température du sol qui accélère la biodégradation, surtout lorsque la couverture du sol est faible et les restitutions organiques au sol réduites (MOREAU et GODEFROY, 1985).

Des carences en calcium ont été rapportées pour les sols de plateau de la Vallée du Niari (MARTIN, 1961 ; BOYER, 1982 ; DABIN, 1985) et du plateau de Mbé-Batéké à Odziba (DZABA, 1984). Le prélèvement du calcium et du magnésium étant inhibé par l'excès de manganèse (MARSCHNER, 1986), on comprend la concomitance observée par différents chercheurs, entre toxicité manganique sur arachide et décalcification des terres au Niari (AUBERT, 1955 ; PREVOT et *al*, 1955 ; OLLAGNIER et PREVOT, 1955). Ces sols du Niari sont riches en manganèse total, élément qui est presque entièrement sous forme facilement réductible (OLLAGNIER et PREVOT, 1955 ; PREVOT et *al*, 1955 ; MARTIN, 1970). Le manganèse échangeable dosé est présent sur le complexe d'échange à des taux de saturation important (30%), mais ne se manifeste que dans un contexte bien particulier de sols dégradés. Il paraît donc possible que les phénomènes de dégradation physique et de toxicité manganique soient liés.

L'intérêt de relever les pH bas par des amendements calcaires dont les apports contribuent en outre à l'amélioration de la structure du sol, a déjà été démontré (MARTIN, 1970). L'apport de calcaire a aussi un rôle non négligeable pour la plante : en effet, l'ion calcium est actuellement reconnu comme le plus important régulateur intercellulaire dans de nombreux processus biochimiques et physiologiques chez la plante. Il joue un rôle vital dans plusieurs aspects de la croissance et du métabolisme du manioc comme la division cellulaire, la rigidité des parois en liaison avec les substances pectiques, l'échange d'ions et le transport des sucres (VARGAS et *al*, 1989).

L'utilisation actuelle du calcaire broyé de Madingou reste cependant problématique : sa nature pulvérulente le fait utiliser comme un engrais sur le plateau de Mbé (400 kg ha⁻¹ localisé le long de la ligne de plantation) et en amendement à l'épandeur d'engrais (1500 kg ha⁻¹) sur le plateau de Mantsoumba et cela, sans que l'on ait toujours procédé à une expérimentation préalable. Il ressort en outre que les apports localisés entraînent l'apparition d'un fort gradient

de pH qui se répercute inévitablement sur les autres caractéristiques du sol, notamment la capacité d'échange (LUMBARANJA et EVANGELOU, 1991).

Ce constat sur l'état des sols et la pratique des amendements calcaires montre que si les données recueillies dans les essais agronomiques indiquent la nature des problèmes rencontrés, elles sont insuffisantes pour comprendre les mécanismes de l'évolution de ces sols sous culture. Par ailleurs, la disparité des modes d'apport du calcaire broyé au sol rend difficile la comparaison de leurs effets, et assez aléatoire la représentativité des prélèvements effectués pour juger de leur impact sur les caractéristiques du sol et en particulier les propriétés d'échange. **D'où la nécessité d'une approche nouvelle.**

Les données recueillies sur le pH montrent qu'il existe un réel problème de remontée difficile du pH et de mobilité du calcaire apporté qui mérite d'être approfondi. Il importe donc non seulement de déterminer des doses théoriques d'amendement mais également de suivre les transformations qu'elles induisent sur les caractères physico-chimiques du sol et ses propriétés d'échange.

Tout ceci justifie la conduite d'essais sur des modèles expérimentaux de laboratoire. Aussi, trois grands axes vont être abordés successivement dans la suite de ce travail :

- meilleure caractérisation de la réactivité du complexe d'échange, à partir d'échantillons prélevés *in situ*, des sols argileux de la Vallée du Niari et sableux du plateau de Mbé-Batéké (chapitre 3) ;
- définition des doses théoriques de calcaire broyé et étude, sur modèles expérimentaux de laboratoire, des effets de la correction de l'acidité sur le complexe d'échange (chapitre 4) ;
- étude, sur échantillons issus de modèles expérimentaux de laboratoire, des répercussions de la correction de l'acidité sur la dynamique d'échange et la disponibilité des nutriments (chapitre 5).

**REACTIVITE DU COMPLEXE D'ECHANGE DES SOLS
FERRALLITIQUES DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU
DE MBE-BATEKE**

«La caractérisation du complexe d'échange a depuis longtemps préoccupé les pédologues du fait de ses implications à la fois agronomiques et pédogénétiques.» (ESPLAU et PEDRO, 1980).

Le sol peut être schématisé comme un système à trois phases : une phase solide poreuse contenant les deux autres, liquide (eau, solutions minérales ou organiques) et gazeuse (air). Il existe des interactions importantes entre la phase liquide et la phase solide, essentiellement sa fraction très fine, dite colloïdale : au contact de cette dernière, le film d'eau s'enrichit en éléments minéraux à la suite de l'intervention de plusieurs phénomènes comme l'échange d'ions, la solubilisation, l'hydrolyse et la minéralisation de la matière organique (CALLOT *et al.*, 1982 ; CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

La capacité de rétention des éléments nutritifs pour les plantes et le pouvoir-tampon des sols tropicaux acides sont à la base des recommandations pour l'application d'engrais et d'amendements. Ces phénomènes sont expliqués par les propriétés d'échange des colloïdes à charges variables qui les composent (UEHARA et GILLMAN, 1981 ; FALLAVIER, 1985 ; GILLMAN, 1991).

Il apparaît donc nécessaire, pour la suite de ce travail consacré à l'étude des effets de l'apport de calcaire broyé et de l'incorporation de matière végétale au sol, d'étudier en premier lieu, les constituants et les propriétés d'échange de la phase solide des sols acides de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Ainsi, dans ce chapitre, la nature des constituants minéraux est déterminée sur les échantillons prélevés *in situ*, puis la réactivité du complexe adsorbant est caractérisée par différents paramètres en fonction des variations du pH.

3.1. CONSTITUANTS MINÉRAUX.

Le complexe adsorbant, constitué par la liaison entre fractions minérale et organique, comprend des particules très fines à surface spécifique importante et chimiquement très actives. Il est formé de minéraux argileux, de composés minéraux plus ou moins cristallisés et de molécules organiques.

Seuls les composés minéraux sont étudiés ici.

L'intérêt de la connaissance de la distribution des minéraux argileux et oxyhydroxydes dans le sol réside, d'une part, dans la compréhension des processus de formation des sols et leur classification (PEDRO, 1976 et 1987) et d'autre part, dans la prévision de leur comportement, notamment les réponses à l'amendement calcaire, la rétention des anions et des cations (JACKSON et *al*, 1986 ; HOSSNER et JUO, 1989 ; BRADY, 1990).

3.1.1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1.1.1. Échantillons de sols

La composition minéralogique de la phase argileuse des sols est étudiée sur douze échantillons provenant des horizons de trois profils de sol situés à Mantsoumba (sous savane et sous culture du Niari) et au PK 45 (sous savane du plateau de Mbé-Batéké).

Ce choix permet de comparer les deux types de sol, argileux de Mantsoumba (NS) dans la Vallée du Niari et sableux PK 45 (BS) sur le plateau de Mbé-Batéké d'une part, et d'autre part, le sol cultivé (NC0) et le sol sous savane (NS) de la Vallée du Niari.

3.1.1.2. Obtention de la fraction argileuse et identification des minéraux

Les minéraux phyllosilicatés et les oxyhydroxydes cristallisés sont identifiés par diffractométrie des rayons X (DRX) à partir d'un dépôt orienté d'une suspension d'argile sur une lame de verre préalablement dégraissée.

L'extraction et la préparation des échantillons d'argile se font selon le protocole préconisé par ROBERT et TESSIER (1974) :

- destruction de la matière organique par l'eau oxygénée à 20 volumes,
- agitation dans une solution de NaCl 0,1 M et dispersion par une série de lavages à l'eau distillée,
- sédimentations successives de la suspension et séparation de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ par siphonnage à une profondeur donnée en fonction de la température (loi de Stockes),
- floculation immédiate du surnageant recueilli par ajout de MgCl_2 M,
- élimination de l'excès de sel par des lavages à l'eau avec contrôle de l'épuisement en chlorure par le nitrate d'argent.

Ce sont les argiles ainsi saturées en magnésium qui permettent une bonne identification (ROBERT et TESSIER, 1974).

Les diagrammes de rayons X sont obtenus sur lame orientée normale, sur lame chauffée à 400 °C et sur lame ayant subi des essais de gonflement au glycérol.

L'analyse est faite à l'aide d'un diffractomètre *SIEMENS D 500* informatisé au Centre ORSTOM de Bondy.

3.1.1.3. Méthode d'analyse des oxydes libres

Les oxydes libres du sol, plus ou moins bien cristallisés et non intégrés au réseau cristallin des silicates sont dosés par extraction avec le réactif citrate - bicarbonate - dithionite de MEHRA et JACKSON (1960). L'extraction au CBD utilise le citrate de sodium comme agent chélatant, le bicarbonate (NaHCO_3 , pH 7,3) comme tampon et le dithionite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) comme réducteur à chaud (80 °C).

L'action réductrice dissolvant le fer et l'action complexante dissolvant à la fois l'aluminium et le fer (CAMBIER, 1986), cette méthode permet d'évaluer les formes libres du fer, notamment hématite (Fe_2O_3) et goéthite (FeOOH), ainsi que l'alumine, la silice et le manganèse associés (JACKSON et *al*, 1986). Elle s'avère la

meilleure pour extraire les oxydes libres, notamment le fer libre, dans les sols ferrallitiques (JEANROY, 1983).

3.1.2. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.2.1. Minéralogie de la fraction fine

Les résultats de diffractométrie révèlent une absence de différences minéralogiques verticales entre horizons de surface (A ou Ap) et de profondeur (B), ce qui limite la discussion à la comparaison des deux types de sol.

Le tableau 3.1-1 présente les variations des constituants cristallographiques entre les sols de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Tableau 3.1-1 : Minéralogie comparée des deux types de sol de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Constituants	Vallée du Niari		Plateau de Mbé-Batéké
	savane	culture	savane
kaolinite désordonnée	+	+	+
interstr. V-I (*)	+	+	-
gibbsite	-	-	+
goethite alumineuse	+	+	+
anatase et rutile	+	+	-
quartz	+	+	+

(*) traces d'interstratifiés vermiculite-illite, identifiés comme tels par DRX, mais probablement micas microdivisés (voir dans le texte).

La kaolinite présente dans ces sols est dite désordonnée, avec des pics décalés et des bandes de diffraction larges. Cette notion de désordre peut être appréhendée à travers l'arrangement des particules primaires (feuillet simples) qui, dans les phyllosilicates argileux, se fait par association bord à bord ou bord-

face et face à face (CHAUVEL *et al.*, 1976 ; TESSIER *et PEDRO*, 1976).

Le désordre dans l'empilement des feuillets résulte sans doute d'une asymétrie due à une rotation des feuillets, à un changement de la position de la lacune octaédrique (CHATELIN, 1974).

Il peut s'agir d'un désordre translationnel dû à un arrangement des feuillets avec glissement des couches successives d'une manière désordonnée (PEDRO, 1979a ; CAILLÈRE *et al.*, 1982). Selon SCHWERTMANN *et HERBILLON* (1992), ce désordre est l'expression de la faible cristallinité (mesurée par absorption des infra-rouges) de la kaolinite des sols tropicaux, en comparaison avec les kaolinites pures des gisements.

Des traces d'interstratifiés vermiculite-illite sont décelées dans le sol de la Vallée du Niari. Ces phyllosilicates 2:1 ont déjà été observées dans les sols à kaolinite où ils sont considérés comme des impuretés (HERBILLON *et al.*, 1981) ; il s'agit vraisemblablement de micas microdivisés, interstratifiés avec les feuillets de la kaolinite désordonnée (CAILLÈRE *et al.*, 1982).

Le fer, présent sous forme de goethite alumineuse est responsable de la couleur jaune à rouge orangé du sol (SEGALEN, 1969 ; BIGHAM *et al.*, 1978). La substitution alumineuse dans la goethite est un processus fréquent, qui constitue plus une règle qu'une exception dans les pédogenèses en régions tropicales (NORRISH *et TAYLOR*, 1961 ; HERBILLON, 1980 ; SCHWERTMANN *et HERBILLON*, 1992).

La gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) est inexistante dans le sol de la Vallée du Niari, l'alumine libérée par hydrolyse se retrouvant sûrement à l'état combiné avec la silice sous forme de kaolinite. La présence de gibbsite dans le sol du plateau de Mbé-Batéké peuvent s'expliquer par la perméabilité importante du matériau sableux qui détermine un drainage intense ne favorisant pas sa recombinaison avec la silice (ESWARAN *et TAVERNIER*, 1980 ; HERBILLON, 1980 *et* 1994). L'hypothèse d'une destruction de la kaolinite peut également être évoquée.

Le titane n'est présent que dans les sols de la Vallée du Niari où il apparaît sous forme d'anatase (TiO_2 , densité = 3,82 à 3,95 ; couleur brune ou jaune) et de trace de rutil (TiO_2 , densité = 4,2 ; couleur rouge, jaune ou brune).

Le manganèse n'est pas décelé par diffraction des rayons X, bien que des nodules ferromanganiques noirs soient observés sur les profils de sol de la Vallée du Niari. Selon CHATELIN (1974), c'est la faible cristallinité de la pyrolusite (MnO_2) dans les sols qui rend difficile son identification aux rayons X. D'autre part, l'eau oxygénée à pH 5 dissolvant sélectivement la pyrolusite (JACKSON *et*

al, 1986), cette non-détection pourrait donc résulter simplement d'un artefact au cours de la préparation des échantillons de sol, notamment la destruction de la matière organique.

Le quartz est présent dans les deux types de sol. Dans le sol de la Vallée du Niari, cette présence peut résulter soit d'un apport des formations schisto - gréseuses dominant au sud le schisto - calcaire (allochtonie), soit comme l'évoquent ESWARAN et STOOPS (1979), d'une précipitation de la silice qui forme le quartz secondaire.

3.1.2.2. Teneurs en oxydes libres

Les données du tableau 3.1-2 permettent de comparer les sols sous savane de la Vallée du Niari (NS) et du plateau de Mbé-Batéké (BS) d'une part, et d'autre part d'examiner les différences éventuelles entre le sol sous savane (NS) et le sol cultivé (NC0) dans le cas de la Vallée du Niari.

Il ressort que sous savane, les teneurs en alumine libre, plus élevées dans l'horizon de surface du sol de la Vallée du Niari, diminuent dans l'horizon de profondeur, tandis qu'elles augmentent sur le plateau de Mbé-Batéké.

Les teneurs en fer libre sont par contre beaucoup plus importantes dans le sol du plateau de Mbé-Batéké où elles augmentent d'ailleurs dans l'horizon de profondeur, tout comme celles de l'alumine.

Les résultats de cette analyse confirment la présence d'oxyde de manganèse dans le sol de la Vallée du Niari et son absence dans celui du plateau de Mbé-Batéké. Ils peuvent être rapprochés des observations faites au § 2.4, concernant les risques de toxicité manganique à Mantsoumba (dans la Vallée du Niari) et aluminique au PK 45 (sur le plateau de Mbé-Batéké).

La teneur en silice libre est supérieure dans l'horizon de surface de la Vallée du Niari tandis qu'elle diminue en profondeur (35-70 cm) où elle est identique dans les deux sols.

Les teneurs en titane libre ne diffèrent pas d'un sol à l'autre et baissent dans l'horizon de profondeur.

Dans la Vallée du Niari, la comparaison entre sols sous savane (NS) et sous culture (NC0) fait apparaître une diminution importante des teneurs en alumine et fer libres de l'horizon 0-10 cm sous culture qui deviennent du même ordre de grandeur que celles de l'horizon profond sous savane. On note également une très forte baisse des teneurs en manganèse.

Tableau 3.1-2 : Oxydes libres (en g kg⁻¹) dans les sols sous savane (Plateau de Mbé-Batéké : BS, Vallée du Niari : NS) et sous culture de la Vallée du Niari (NC0).

Echantillon Prof. (cm)		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	SiO ₂	TiO ₂
		g kg ⁻¹				
BS	0-10	1,14 _b 0,07	0,75 _d 0,04	0,00 _a 0,00	0,38 _b 0,06	0,07 _c 0,01
	35-70	1,62 _c 0,04	1,93 _e 0,00	0,00 _a 0,00	0,14 _a 0,01	0,03 _a 0,00
NS	0-10	2,06 _d 0,04	0,54 _c 0,02	1,62 _e 0,01	0,59 _c 0,02	0,07 _c 0,00
	35-70	0,80 _a 0,06	0,39 _b 0,00	1,50 _d 0,06	0,13 _a 0,02	0,02 _a 0,01
NC0	0-10	0,83 _a 0,02	0,34 _a 0,01	0,10 _b 0,00	0,41 _b 0,01	0,05 _b 0,01
	35-70	0,84 _a 0,01	0,34 _a 0,01	0,98 _c 0,03	0,18 _a 0,03	0,03 _a 0,01

Pour chaque colonne (oxyde), les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 95% selon le test de Newman-Keuls. Les chiffres écrits en taille plus petite indiquent les écart-types sur chacune des moyennes.

Cette diminution notable des teneurs en oxyhydroxydes pourrait expliquer en partie la péjoration de la structure des horizons supérieurs du sol cultivé (Cf § 2.4) du fait du rôle de cimentation de la structure qui leur est attribué.

En outre, la proportion d'oxyhydroxydes est plus forte dans le sol du plateau de Mbé-Batéké, eu égard aux taux d'argile granulométrique des deux sols.

En substance, cette étude des constituants minéraux montre que la fraction fine de ces sols est constituée de kaolinite et oxyhydroxydes. Les conséquences d'une telle composition minéralogique sur les propriétés d'échange du sol résident en deux points essentiels :

- la kaolinite, la plus simple des argiles, avec des feuillets de type 1:1 dioctaédrique, ne développe pratiquement aucune charge négative de substitution à la surface des feuillets qui restent accolés (PEDRO, 1976 et 1987 ;

DUCHAUFOR, 1991) ; de ce fait, les charges, faibles ou nulles, sont localisées surtout dans les zones de rupture latérales des feuillets, sur les bordures aluminiques et siliciques, et sont donc dépendantes du pH.

- dans les sols ferrallitiques, les oxydes libres sont plus ou moins fortement polymérisés entre les feuillets d'argile ou en revêtement sur les surfaces des argiles (ROBERT et TESSIER, 1974 ; ROBERT et *al*, 1983) et sont microagrégés avec la kaolinite dans des liaisons de nature chimique (CAMBIER et PICOT, 1988). A ce titre, ils sont considérés comme responsables de blocage de certains sites d'échange.

Ce sont des composés à charges variables qui nécessitent une approche particulière. Tous ces minéraux sont associés à de la matière organique, elle-même un colloïde à charges variables (BOLT et BRUGGENWERT, 1978 ; COLEMAN et *al*, 1989).

D'où l'importance de la connaissance de la variation des charges de surface en fonction du pH pour la prévision du comportement du sol lors de la correction de l'acidité.

3.2. CHARGES DE SURFACE

3.2.1. RAPPELS SUR L'ORIGINE DES CHARGES VARIABLES DU SOL

Comme il a été signalé plus haut, l'acidité (ou l'alcalinité) du sol est en dernier ressort régulée par les réactions d'échange ionique entre la solution du sol et les surfaces des particules de sol (CALLOT et *al*, 1982 ; OADES et *al*, 1989).

La notion de charges variables indique que ces charges sont dépendantes du pH, de la composition et de la concentration de la solution de contact (UEHARA et GILLMAN, 1981).

On peut ainsi distinguer à l'interface solide/électrolyte, les ions responsables de la charge (ions déterminant le potentiel ou IDP) des ions indifférents qui, eux, ne sont adsorbés que lorsque la surface est déjà chargée (PARKS et DE BRUYN, 1962 ; VAN RAIJ et PEECH, 1972 ; BOWDEN et *al*, 1980 ; HERBILLON, 1988).

Les IDP les plus courants sont H^+ et OH^- . Leur activité en solution gouverne l'apparition des charges positives et négatives soit par des processus d'adsorption-désorption de protons (H^+) et d'ions hydroxyles (OH^-) soit de dissociation des sites de surface (PARKS et DE BRUYN, 1962 ; OADES et *al*, 1989).

Les processus de variation des charges requièrent la présence des ions déterminant le potentiel, en quantités suffisantes pour que l'adsorption se fasse. La charge nette, qui résulte des équilibres entre la solution et l'interface, est déterminée par l'ion qui est en excès dans la solution.

La figure 3.1-1 illustre quelques réactions responsables de la variation des charges dans un sol.

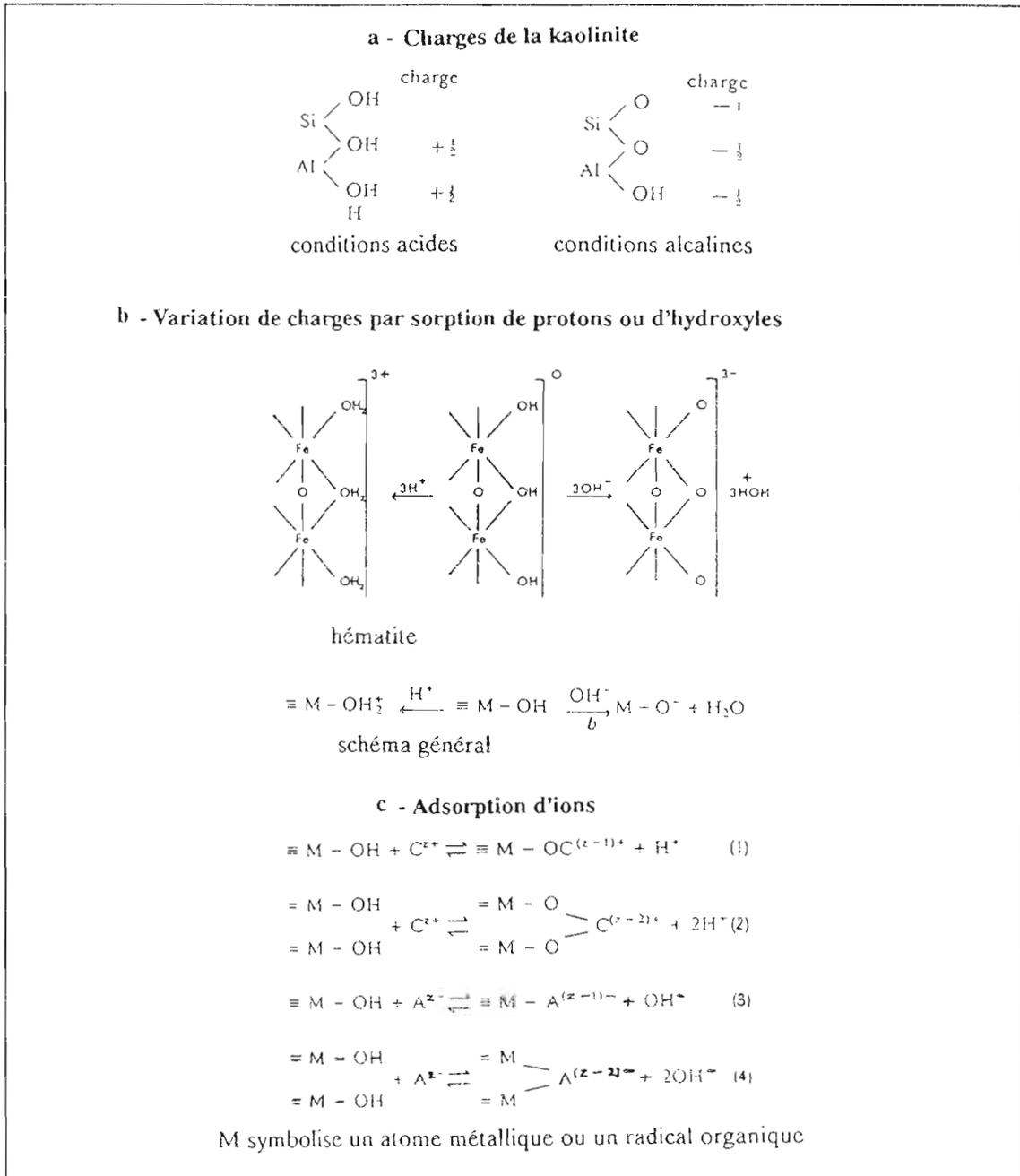


Figure 3.2-1 : Illustration de quelques réactions conduisant à la modification de la charge de surface (d'après PARKS et DE BRUYN, 1962 ; VAN RAUJ et PEECH, 1972 ; UEHARA et GILLMAN, 1981).

Au contact d'un électrolyte, les couches hydroxylées (de la kaolinite ou de l'hématite par exemple) sont capables d'adsorber ou de désorber des protons et des hydroxyles, suivant l'activité des H^+ et OH^- en solution, c'est-à-dire le pH (fig. 3.2-1a et b), conduisant ainsi à l'apparition des charges positives ou négatives.

Ainsi, à partir d'une surface neutre, l'augmentation du pH favorise la fixation d'ions hydroxyles OH^- avec apparition d'une charge négative, donc une augmentation de la capacité d'échange cationique.

On remarquera, en passant, qu'il est pratiquement impossible de distinguer dans ces cas une adsorption d'ions hydroxyles d'une désorption de protons (PARKS et DE BRUYN, 1962).

L'adsorption de cations et d'anions, qui met en jeu un mécanisme chimique, est également susceptible de modifier la densité de charge (figure 3.2-1) : si la valence (z) de l'ion adsorbé est égale à 1, les réactions C(1) et C(3) ne modifient pas la charge, alors que si $z = 2$, il y a apparition d'une charge de même signe que l'ion fixé. L'effet inverse est obtenu avec les réactions C(2) et C(4).

Outre cette capacité des minéraux du sol à réagir avec les ions de la solution, la dissociation des groupements carboxyles (COO^-) et hydroxyles (OH^-) phénoliques de la matière organique est également responsable des charges variables du sol (PARFITT, 1980 ; TATE et THENG, 1980 ; MEIJER et BUURMAN, 1987). L'humus peut ainsi avoir une CEC à pH très bas car la dissociation des groupements carboxyliques commence à pH 3 et augmente avec le pH (TAN, 1993).

3.2.2. PRESENTATION DES METHODES ET PARAMETRES UTILISES POUR L'ETUDE DES CHARGES DE SURFACE

Conçues au départ pour des matériaux purs ou relativement homogènes, les méthodes d'étude des charges variables adaptées aux sols sont rassemblées en trois groupes :

- méthodes électrocinétiques,
- courbes de titrage potentiométrique,
- étude de l'adsorption ionique.

Les méthodes électrocinétiques ne permettent que la détermination de points singuliers comme le point isoélectrique (où la mobilité électrophorétique est nulle). Aussi, l'étude de la variation des charges en fonction du pH revient-elle le plus souvent à établir des courbes de titrage potentiométrique et des courbes d'adsorption d'ions (ESPLAU, 1987 et 1994 ; MARCANO-MARTINEZ et McBRIDE, 1989).

Ces méthodes par équilibrage chimique ont été favorisées car elles sont plus facilement applicables aux assemblages hétérogènes de constituants que sont les sols.

3.2.2.1. Titrage potentiométrique

La méthode potentiométrique est basée sur la mise en équilibre du sol avec des quantités croissantes d'IDP (H^+ et OH^-), dans des solutions d'électrolyte indifférent de concentrations différentes (Cf protocole au tableau 3.2-1).

La mesure du pH à l'équilibre permet de déterminer la quantité de H^+ ou de OH^- restant en solution et la différence avec la quantité ajoutée pour amener une solution sans sol («blanc») au même pH correspond *en principe* à la quantité adsorbée sur le complexe d'échange du sol. On admet classiquement, d'après le modèle de UEHARA et GILLMAN (1980 et 1981), que les protons ou les hydroxyles ayant disparu de la solution d'équilibre au cours du titrage ont été adsorbés sur le complexe avec apparition de charges positives ou négatives.

Ces valeurs d'adsorption nette sont représentées graphiquement en fonction du pH. La figure 3.2-2 illustre le mode de construction des courbes en vue

de la détermination des paramètres caractéristiques.

Le passage de cette adsorption nette (fig. 3.2-2a) aux charges positives et négatives nettes (fig. 3.2-2b) se fait par translation parallèle à l'axe des ordonnées.

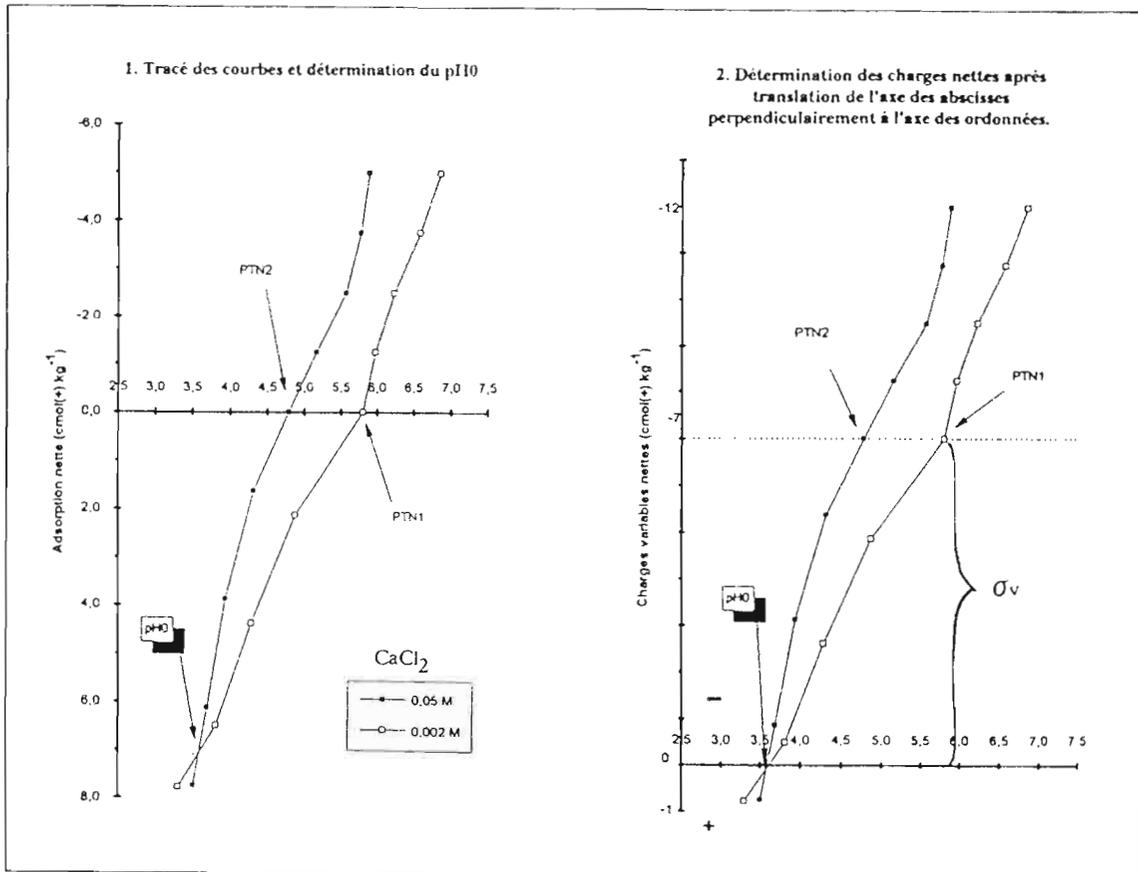


Figure 3.2-2 : Mode de construction des courbes et détermination des valeurs caractéristiques.

3.2.2.1.1. Points remarquables

Les *points de titrage nul* (PTN) représentent les pH de départ (sans apport de H^+ ni de OH^-) ; ils sont différents selon la concentration de la solution de l'électrolyte.

Parmi les paramètres couramment utilisés dans l'étude du comportement d'un système à charge variable, le point de charge nulle plus connu sous la terminologie anglo-saxonne *Zero Point of Charge* ou *ZPC* (PARKS et DE BRUYN, 1962 ; MORAIS et al, 1976 ; UEHARA et GILLMAN, 1981 ; HERBILLON, 1988) est un des plus importants. Le *ZPC* est la valeur du pH à l'équilibre d'une solution

en contact avec une particule dont la charge variable nette de surface est nulle (SSSA, 1987).

Dans les courbes potentiométriques, en l'absence d'adsorption spécifique, il existe une valeur de pH où les courbes se coupent, quelle que soit la concentration en électrolyte de la solution d'équilibre (fig. 3.2-2a). Cette intersection des courbes matérialise le *point d'effet de sel nul* (PESN) ou *Point of Zero Salt Effect* (PZSE). Lorsque l'échange est complet, c'est-à-dire qu'aucun ion autre que les IDP n'interagit chimiquement avec la surface, le PESN se confond avec le point de charge nette nulle (PARKER et al, 1979 ; SPOSITO, 1981).

Toutefois, cette condition n'est généralement pas remplie pour les sols, mélanges hétérogènes de constituants minéraux et organiques, où peuvent exister des charges permanentes dues aux substitutions isomorphiques. Ce point d'effet de sel nul est alors plus commodément désigné par pH_0 (UEHARA et GILLMAN, 1980 et 1981 ; FALLAVIER, 1985 ; GILLMAN, 1991).

Le pH_0 est une valeur remarquable qui permet d'étudier la charge du complexe. En effet, lorsque $pH > pH_0$, la charge nette du complexe est négative et le sol présente une capacité d'échange cationique. C'est le contraire qui prévaut aux valeurs de $pH < pH_0$.

3.2.2.1.2. Charge variable et charge permanente

Eu égard à ce qui précède (H^+ ou OH^- consommés = adsorption nettes = = => charges nettes), les courbes de titrage représentent donc l'évolution de la charge variable nette du sol en fonction du pH. Elles permettent d'évaluer graphiquement la charge variable nette du sol à son pH effectif.

La charge variable nette est obtenue graphiquement (fig. 3.2-2b), après translation de l'axe des abscisses (pH) jusqu'au point de rencontre des deux courbes (pH_0). A partir de cette nouvelle ordonnée nulle, on mesure la *charge variable nette* (σ_v) au point de titrage nul.

A $pH = pH_0$, on considère qu'il y a une annulation des charges variables due à une égale quantité de H^+ et OH^- adsorbée sur les surfaces des colloïdes. Tout excès d'adsorption de cations est attribué aux charges permanentes négatives et tout excès d'anions détermine les charges permanentes positives.

C'est donc naturellement à $pH = pH_0$ qu'est déterminée la *charge permanente* par la mesure de l'adsorption simultanée du cation et de l'anion de l'électrolyte (SPOSITO, 1983 ; UEHARA et GILLMAN, 1980).

3.2.2.2. Adsorption d'ions.

Les échantillons sont traités de la même façon et soumis aux mêmes conditions d'équilibre que dans le cas précédent. La chimisorption des H^+ et des OH^- n'est plus considérée et on mesure l'adsorption du cation et de l'anion de l'électrolyte indifférent (UEHARA et GILLMAN, 1981 ; ESPIAU, 1987 et 1994 ; MARCANO-MARTINEZ et McBRIDE, 1989).

L'adsorption du cation et de l'anion donne respectivement la capacité d'échange cationique (CEC) et la capacité d'échange anionique (CEA) variables avec le pH.

* * *

Ces deux méthodes d'étude des charges de surface (titrage potentiométrique et adsorption d'ions) vont à présent être appliquées aux sols de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké, en vue d'une meilleure prévision du comportement de leur complexe d'échange par suite des variations de pH.

3.2.3. APPLICATION AUX SOLS DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU DE MBE-BATEKE.

L'application des méthodologies ci-dessus évoquées permet de caractériser et de comparer les sols étudiés selon les paramètres précédemment définis.

L'utilisation de la titrimétrie permet d'établir des courbes potentiométriques desquelles découlent les déterminations de la *variation des charges nettes* en fonction du pH, du *point de charge nulle* (pH_0) et de la *charge variable nette* au pH du sol.

La mesure de l'adsorption ionique permet de caractériser la *charge permanente* (par adsorption à $pH = pH_0$), d'établir les courbes de variation des *capacités d'échange anionique* et *cationique* en fonction du pH.

3.2.3.1. Matériels et méthodes

3.2.3.1.1. Echantillons de sols

Les déterminations des paramètres par titrimétrie ont porté sur douze échantillons de sol séché à l'air et passé au tamis de 2 mm. Ces échantillons proviennent des horizons du sol sous culture mécanisée et sous savane du plateau de Mantsoumba (Vallée du Niari) d'une part, et du sol sous savane du plateau de Mbé-Batéké, d'autre part (Cf §2.1 et 3.3.3.1).

A l'issue de cette première approche, quatre échantillons provenant des horizons de surface et de profondeur ont été retenus pour l'étude des adsorptions cationique et anionique en fonction du pH.

3.2.3.1.2. Mode opératoire pour la titrimétrie

La procédure utilisée pour les mesures titrimétriques est celle établie par VAN RAIJ et PEECH (1972) et reprise par de nombreux auteurs (GALLEZ et *al*, 1976 ; UEHARA et GILLMAN, 1980 et 1981 ; FALLAVIER, 1985 ; SAKURAI et *al*, 1988 ; GILLMAN, 1991).

Les déterminations doivent se faire à des conditions aussi proches que possible de celles prévalant sur le terrain : il est conseillé d'utiliser le cation dominant (STOOP, 1980 ; GILLMAN, 1991), en l'occurrence le calcium pour les sols considérés.

La mise en équilibre se fait de manière invariable avec 2 g de sol et 20 mL de solution (MARCANO-MARTINEZ et McBRIDE, 1989), soit un rapport sol/solution de 1/10 qui est jugé le meilleur (SAKURAI et *al*, 1988). Les mesures sont faites dans des solutions de CaCl₂ de concentrations finales 0,05 et 0,002 M.

Ainsi, $2 \pm 0,01$ g de sol sont pesés dans chacun des 8 tubes de 30 mL de la série. Les solutions sont ajoutées selon les indications du tableau 3.2-1 et les flacons sont bouchés.

L'ensemble est mis en contact pendant trois jours à la température du laboratoire (25 ± 2 °C), avec trois agitations quotidiennes de 30 minutes chacune.

Le quatrième jour, le pH est mesuré et les quantités de H⁺ et OH⁻ adsorbées (charges nettes) par le sol sont calculées pour un pH donné après correction du volume v de HCl ou de NaOH ajouté, diminué du volume v' d'acide ou de base nécessaire pour porter à la même valeur le pH de la solution d'électrolyte prise seule.

Tableau 3.2-1 : Protocole de préparation des solutions pour l'étude des charges variables dans le sol.

n° du tube	Acidification			Zéro		Alcalinisation		
	1	2	3	4	5	6	7	8
Prise de sol (g)	< -----2----- >							
HCl 0,1 N (mL)	1,5	1	0,5	0	-	-	-	-
NaOH 0,1 N (mL)	-	-	-	0	0,25	0,5	0,75	1
eau milli-Q (mL)	8,5	9	9,5	10	9,75	9,5	9,25	9
CaCl ₂ (0,1 ou 0,004M)	< -----10----- >							
volume total (mL)	< -----20----- >							

Les charges nettes, égales à $50(v-v') \times 0,1$ cmol kg⁻¹ sont alors représentées graphiquement en fonction du pH. Le pH₀ et la charge variable nette sont déterminés comme illustré par la figure 3.2-2.

Les charges permanentes sont déterminées par mesure de l'adsorption à pH = pH₀, dans une solution de CaCl₂ 0,002 M et le mode de calcul est celui mis en oeuvre ci-après pour l'adsorption d'ions. La *charge permanente nette* est alors égale à la différence entre les adsorptions anionique et cationique.

3.2.3.1.3. Mode opératoire pour l'adsorption d'ions

La mesure de l'adsorption d'ions en fonction du pH permet d'estimer l'évolution des capacités d'échange anionique (CEA) et cationique (CEC). Elle est déterminée à partir des quantités de Ca²⁺ et Cl⁻ retenues par le sol à différents pH (GILLMAN, 1991).

Des prises d'essai de $2 \pm 0,01$ g de sol sont pesées dans des tubes à centrifuger préalablement tarés.

L'échantillon est préalablement saturé avec la solution de CaCl₂ 0,002 M par quatre agitations et centrifugations successives. Comme pour la titrimétrie, 20 mL de chacune des solutions sont ajoutés dans les 8 tubes d'une série, afin de rester dans une gamme de pH variant entre 2,5 et 7,5 (tableau 3.2-1).

L'ensemble est conservé à la température de 25 ± 2 °C pendant trois jours, avec des agitations quotidiennes de 30 mn. Le quatrième jour, une centrifugation permet de recueillir le surnageant qui est conservé.

Le tube est pesé afin de déterminer par différence la quantité de liquide v (en L) contenant vC mmol de $1/2\text{Ca}^{2+}$ ou de Cl⁻, C étant la

concentration exactement mesurée de CaCl_2 .

Les ions Ca^{2+} et Cl^- fixés sont déplacés par 5 lavages de 20 mn chacun avec 20 mL de NH_4NO_3 $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, recueillis dans une fiole de 100 mL et le volume est ajusté au trait de jauge.

Cette solution d'extraction est analysée afin de déterminer les concentrations C' en Ca^{2+} , Cl^- et Al^{3+} . Le dosage de ce dernier se justifie par le fait qu'aux pH bas, les formes solubles de l'aluminium pouvant participer à l'échange, sa non-prise en compte sous-estimerait l'importance des charges négatives (UEHARA et GILLMAN, 1980 et 1981 ; ESPIAU, 1987 ; GILLMAN, 1991).

Les charges, exprimées en cmol kg^{-1} , sont alors égales à $(25 C' - 0,5 \nu C) / k$, où k est la valeur en milligrammes, de la centimole de l'ion considéré (200,5 pour Ca^{2+} , 90 pour Al^{3+} et 355 pour Cl^-).

3.2.3.2. Evolution de la charge variable nette

La figure 3.2-3 présente quelques unes des courbes potentiométriques obtenues sur les trois profils de sols étudiés.

Ces courbes représentent l'évolution de la charge variable nette de surface en fonction du pH et de la concentration en électrolyte.

L'allure générale des courbes, en particulier leur plus ou moins grande inclinaison par rapport à l'axe des abscisses, c'est-à-dire leur pente, constitue un premier élément de comparaison entre échantillons de sol.

Ces courbes étant cependant obtenues «point par point», il est nécessaire de les «lisser», afin de permettre des analyses sur des intervalles de pH continus. Le traitement mathématique procède d'un ajustement par un polynôme de degré 5, selon la relation :

$$\text{Charges} = a + b(\text{pH}) + c(\text{pH})^2 + d(\text{pH})^3 + e(\text{pH})^4 + f(\text{pH})^5 .$$

La fonction utilise la méthode des moindres carrés pour ajuster au plus près la courbe aux données expérimentales obtenues. Pratiquement, l'opération consiste à minimiser l'écart quadratique moyen par le solveur de EXCEL (MICROSOFT, 1993).

Dans le cas présent, la pente moyenne des courbes est calculée sur les courbes dans CaCl_2 $0,002 \text{ M}$, qui présentent une partie centrale plus ou moins rectiligne dans la gamme des pH les plus courants dans les sols, soit de 4,5 à 6,0. Les données obtenues, notées $\Delta\sigma\nu$ et exprimées en $\text{cmol} (\text{unité pH})^{-1}$, sont rapportées dans le tableau 3.2-2 .

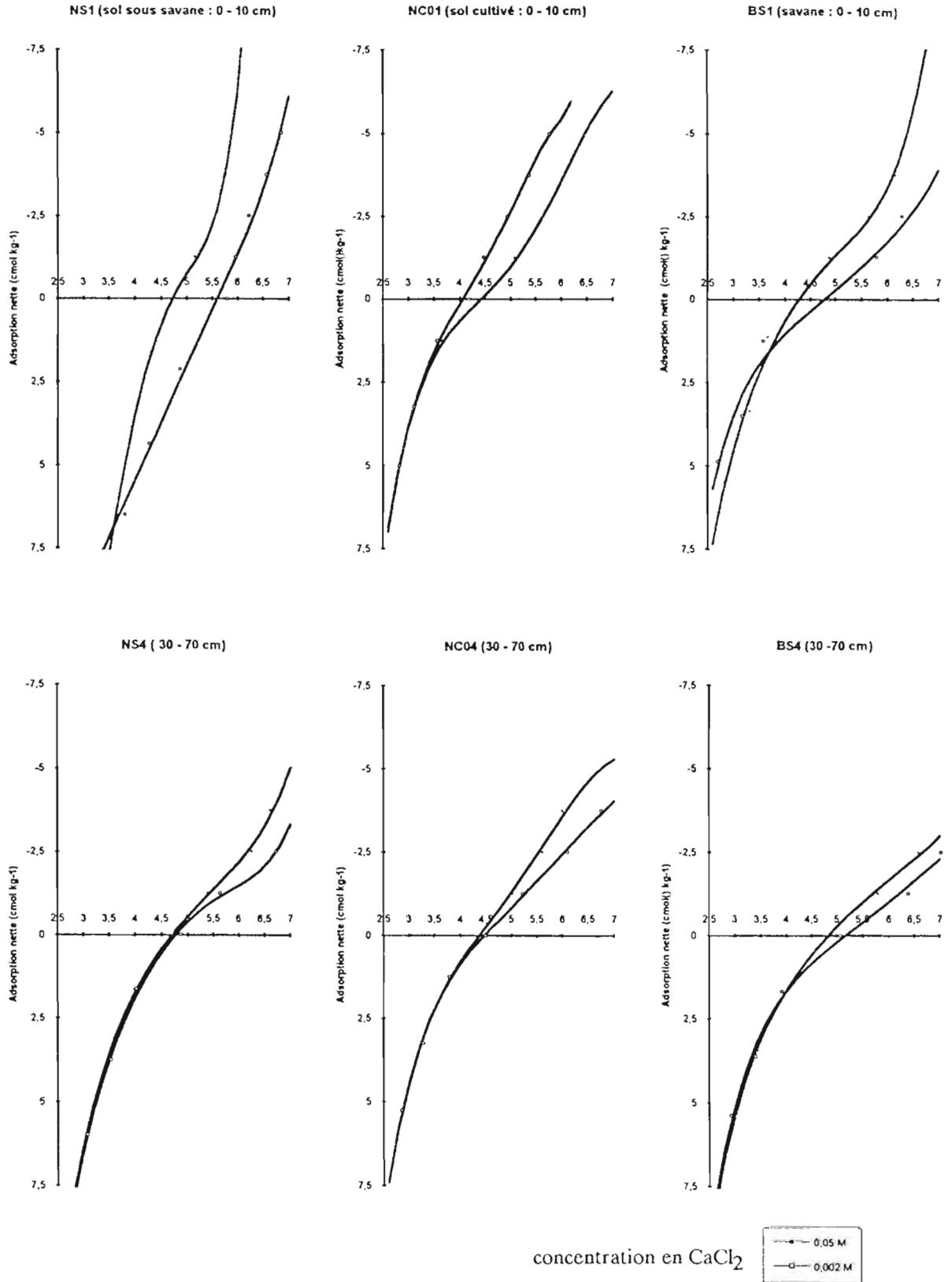


Figure 3.2-3 : Quelques courbes de titrage potentiométrique des horizons des sols sous culture (NC0) de la Vallée du Niari et du sol sous savane du plateau de Mbé-Batéké (BS).

Tableau 3.2-2 : Accroissement moyen de la charge variable nette du sol entre pH 4,5 et 6,0 ($\Delta\sigma_v$ en cmol / unité pH)

Profondeur (cm)	Vallée du Niari		Plateau de Mbé-Batéké
	sous savane (NS)	culture (NC0)	sous savane (BS)
0-10	-3,4	-2,4	-1,4
10-20	-1,9	-1,6	-0,5
20-30	-1,8	-1,5	-1,1
30-70	-1,3	-1,6	-1,2

Ces valeurs sont aussi une forme d'expression du pouvoir tampon du sol, notion qui sera évoquée plus loin (chapitre 4).

L'examen du tableau 3.2-2 révèle que $\Delta\sigma_v$ est :

- d'une part, toujours plus élevé dans le sol de la Vallée du Niari que dans celui du plateau de Mbé-Batéké,

- et d'autre part, plus élevé dans les horizons supérieurs humifères que dans les horizons de profondeur pauvres en matière organique, cette différence étant particulièrement importante dans la Vallée du Niari.

En outre, au Niari, le sol présente un $\Delta\sigma_v$ plus élevé sous savane que sous culture ; celui-ci est d'autant plus marqué que l'on considère les horizons superficiels plus riches en matière organique. Ces différences verticales entre des horizons de composition minéralogique identique, peuvent être attribuées au rôle de tampon joué par l'aluminium (Cf §1.1 ; MacLEAN, 1976) en profondeur ; pour les horizons de surface, il s'agirait vraisemblablement de la contribution des groupes fonctionnels fortement acides de la matière organique comme l'ont évoqué MARCANO-MARTINEZ et McBRIDE (1989).

Au total, les valeurs de $\Delta\sigma_v$ mettent bien en évidence un effet de la texture (sol argileux du Niari > sol sableux de Mbé-Batéké) et un effet de la matière organique (horizons humifères > horizons de profondeur ; savane > culture).

Les différences de comportement entre différents sols et horizons d'un même sol peuvent s'expliquer par la nature des constituants, leurs proportions relatives ainsi que leur mode de liaison.

3.2.3.3. pH_0

Les valeurs de pH_0 obtenues au point d'intersection des courbes potentiométriques sont reprises dans le tableau 3.2-3.

Il en ressort que les deux sols sous savane présentent des profils de pH_0 comparables. Les valeurs de pH_0 augmentent avec la profondeur, en liaison sûrement avec la diminution des teneurs en matière organique, comme l'ont noté VAN RAIJ et PEECH (1972) puis GALLEZ et *al* (1976).

Tableau 3.2-3 : Point de charge nulle (pH_0), point de titrage nul (PTN) et charge variable nette (σ_v) pour trois profils de sol de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Echantillons		pH_0	PTN	$ pH_0 - PTN $	σ_v
					cmol(+) kg^{-1}
sol	BS1	3,6	4,9	1,3	-1,2
	BS2	3,7	5,1	1,4	-1,3
sous	BS3	4,0	5,1	1,1	-1,6
	BS4	4,0	5,1	1,1	-1,3
savane	NS1	3,6	5,8	2,2	-7,1
	NS2	3,8	4,6	0,8	-1,5
	NS3	3,8	5,0	1,2	-3,2
	NS4	4,0	4,9	0,9	-1,6
sol	NC01	3,2	4,5	1,3	-3,0
	NC02	3,6	4,5	0,9	-1,1
cultivé	NC03	3,6	4,4	0,8	-1,2
	NC04	3,8	4,5	0,7	-1,2

pH_0 = pH au point de charge nette nulle, PTN = pH au point de titrage nul (dans $CaCl_2$ 0,002 M, rapport 1/10),

σ_v = charge variable nette, exprimée en $cmol\ kg^{-1}$, le signe (-) indiquant qu'il s'agit d'une charge négative.

Dans la Vallée du Niari, on note un abaissement du pH_0 sous culture, surtout marqué dans les horizons supérieurs, ce qui augmente les risques d'acidification. En effet, à $pH = pH_0$, la stabilité du système surface-solution est maximum ; il s'ensuit que le système tendrait à évoluer jusqu'à ce que le pH de la solution atteigne pH_0 (FALLAVIER, 1985).

Les valeurs de pH_0 des sols étudiés concordent avec celles mesurées par GALLEZ et *al* (1976) qui obtiennent des pH_0 de 3,0 à 3,9 dans des horizons

supérieurs de sols du Nigéria. Elles sont cependant inférieures à celles rapportées par GALLEZ et *al* (1976) pour la plupart des horizons Bt des *Oxisols* (5,5) mais proches pour les *Ultisols* (4,0) et les *Alfisols* (3,5). VAN RAIJ et PEECH (1972) rapportent des pH_0 de 1,9 à 3,5 pour les horizons supérieurs et de 2,7 à 6,0 pour les horizons B des sols tropicaux du Brésil, beaucoup plus riches en hématite que ceux du Congo. MORAIS et *al* (1976) trouvent quant à eux des pH_0 de 3,2 pour l'horizon A et 6,0 pour l'horizon B d'un *Haplorthox* du Brésil.

Les valeurs de pH_0 couramment rapportées dans la littérature sont de 2,8 à 3,5 pour la kaolinite (GALLEZ et *al*, 1976), de 2 à 2,5 pour la silice et de 9,7 à 10 pour la gibbsite (BOLLAND et *al*, 1976); ces valeurs dépendent du degré d'altération des minéraux (GALLEZ et *al*, 1976), en particulier du processus de désilicification (HERBILLON, 1974). Le pH_0 des oxyhydroxydes de fer varie de 7 à 8,5 selon la composition et le degré de cristallinité (PARKS et DE BRUYN, 1962; ANKOMAH, 1991; TAN, 1993), mais le manganèse joue un rôle important en abaissant la valeur du pH_0 (ESWARAN et TAVERNIER, 1980).

Les acides humiques et fulviques qui participent aux charges variables ont leur pH_0 variant de 3 à 5 (PARFITT, 1980).

Les nombreuses interactions entre ces différents constituants aboutissent donc dans les sols à des valeurs de pH_0 intermédiaires.

Si les profils de pH_0 sont comparables entre les sols argileux du Niari et ceux de Mbé-Batéké, des différences apparaissent cependant lorsque l'on considère le paramètre $|pH_0 - pTN|$. Ce dernier fournit une indication sur la plage de pH dans laquelle s'exprime la charge variable nette.

La valeur de ce paramètre diminue avec la profondeur : de 2,2 à 0,9 pour le Niari et de 1,3 à 1,1 pour Mbé-Batéké. Dans le cas de la Vallée du Niari, on note une diminution de ce même paramètre sous culture, par rapport au sol sous savane (tableau 3.2-3).

L'abaissement du pH_0 constaté sous culture aurait pu se traduire par une augmentation du paramètre $|pH_0 - pTN|$ mais cet effet est contrecarré par des valeurs de pH plus faibles au pTN du sol sous culture. La réduction de ce paramètre reflète une dégradation des caractéristiques électrochimiques par rapport au sol sous savane.

Les courbes potentiométriques obtenues sur les horizons de profondeur des sols sous savane et sur l'ensemble du profil de sol sous culture (fig. 3.2-3) montrent qu'en lieu et place d'un point d'effet de sel nul, ces sols présentent plutôt une **courbe d'effet de sel nul**. Des observations analogues ont été rapportées par MEIJER et BUURMAN (1987). Ces résultats suggèrent deux conséquences essentielles :

- l'existence d'une gamme de pH, en-deçà du pH_0 , pour laquelle la charge ne dépend plus de la concentration en électrolyte,
- l'évidence que le complexe a presque toujours une charge nette négative ; lorsque des charges positives existent, leur importance reste très faible.

3.2.3.4. Charge variable nette

Les valeurs de charge variable nette déduites des courbes titrimétriques sont reportées dans le tableau 3.2-3.

La charge variable nette (σ_v) est six fois plus élevée dans l'horizon de surface du sol sous savane de la Vallée du Niari ($7,1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) que dans celui du plateau de Mbé-Batéké ($1,2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$).

Le sol du plateau de Mbé-Batéké présente un profil de charge variable nette peu différencié.

Dans la Vallée du Niari, la comparaison des profils sous savane et sous culture montre que la mise en culture a entraîné une diminution de moitié de la charge variable nette dans l'horizon 0 - 10 cm. Dans tous les cas cependant, σ_v reste plus faible dans les horizons de profondeur ($< 2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$).

Comme pour le $\Delta\sigma_v$, les résultats mettent bien en évidence un effet de la texture (sol argileux du Niari > sol sableux de Mbé-Batéké) et un effet de la matière organique (horizons humifères > horizons de profondeur ; savane > culture).

3.2.3.5. Charge permanente

Les valeurs de charge permanente (σ_p), obtenues d'après UEHARA et

GILLMAN (1980 et 1981), par différence entre adsorptions anionique et cationique à pH_0 sont reportées dans le tableau 3.2-4.

Tableau 3.2-4 : Charges permanentes par mesure de l'absorption à partir d'une solution de $CaCl_2$ 0,002 M.

Echantillons		pH_0	adsorption à pH_0			σ_p
			Ca^{2+}	Al^{3+}	Cl^-	
		cmol(+) kg^{-1}				
sol	BS1	3,6	1,85	0,79	0,01	-2,63
	BS2	3,7	1,40	0,85	0,08	-2,17
	BS3	4,0	0,99	1,05	0,13	-1,91
	BS4	4,0	1,01	1,19	0,12	-2,08
sous	NS1	3,6	0,80	1,64	0,03	-2,41
savane	NS2	3,8	0,93	1,36	0,16	-2,13
	NS3	3,8	0,93	1,15	0,33	-1,75
	NS4	4,0	1,37	1,00	0,17	-2,20
	sol	NC01	3,2	1,17	1,43	0,00
cultivé	NC02	3,6	1,13	1,45	0,00	-2,58
	NC03	3,6	0,99	1,35	0,00	-2,34
	NC04	3,8	0,87	1,45	0,00	-2,32

pH_0 = pH au point de charge nette nulle

σ_p = charges permanentes ; elles sont exprimées en $cmol\ kg^{-1}$, le signe (-) indiquant qu'il s'agit de charges négatives.

Il n'y a pas de différences bien nettes entre les profils étudiés pour des horizons correspondants : l'effet texture n'apparaît pas, tout comme celui de la matière organique reste très peu marqué. Il est possible d'observer dans chaque profil un minimum entre 20 et 30 cm (BS3, NS3 et NC03).

Les charges permanentes sont **toujours négatives**, ce qui dénote d'une capacité d'échange cationique permanente dans les sols de la Vallée du Niari et ceux du plateau de Mbé-Batéké.

D'une façon générale les charges permanentes sont dues à la coexistence de substitutions isomorphiques de Ti^{4+} par Fe^{3+} dans les hydroxydes et de Al^{3+} par Si^{4+} dans la kaolinite (BOLLAND et al, 1976 ; MORAIS et al, 1976 ; SPOSITO, 1983 ; HERBILLON, 1988). Le déficit de charge qui en découle est dans ce

cas positif et des charges permanentes positives ont ainsi été rapportées par TESSENS et ZAUYAH (1982) pour six des neuf Oxisols qu'ils ont étudiés.

L'hypothèse de la substitution isomorphique ne peut être retenue pour les charges permanentes (σ_p) négatives obtenues ici.

L'existence de charges permanentes dans certaines kaolinites a été attribuée à la présence d'impuretés de phyllosilicates 2:1 associées le plus souvent en interstratification, aux feuillets 1:1 de la kaolinite (HERBILLON et *al*, 1981). Cette hypothèse, évocable pour le sol de la Vallée du Niari eu égard à sa minéralogie (Cf §3.1), ne suffit pas pour expliquer les résultats.

L'origine de ces charges permanentes négatives doit donc être recherchée, en discutant la réactivité de la kaolinite, des oxydes mixtes et des associations kaolinite - oxyhydroxydes dans le sol (GALLEZ et *al*, 1976 ; ESPIAU, 1986).

Du point de vue des caractéristiques cristallographiques des feuillets, la kaolinite ne développe pratiquement aucune charge négative de substitution à la surface des feuillets qui sont électriquement neutres (PEDRO, 1987 ; DUCHAUFOR, 1991). Si cela est vrai pour les kaolinites bien cristallisées de gisements (Saint-Austell, Provins ...), plusieurs auteurs ne considèrent pas moins que les feuillets de la kaolinite sont chargés négativement (SCHOFIELD, 1949 ; BOLLAND et *al*, 1976).

Il existe des indications selon lesquelles les kaolinites des sols tropicaux acides sont très riches en fer, ce qui leur confère des propriétés particulières, dues notamment à leur désordre structural et leur faible cristallinité (MESTDAGH et *al*, 1980 ; SCHWERTMANN et HERBILLON, 1992). Ces kaolinites désordonnées pourraient ainsi présenter des défauts de structure et des substitutions pouvant générer des charges intrinsèques (ou permanentes) tant au niveau des particules (cristallites) que des agrégats de particules (microdomaine).

En substance, l'existence de charges permanentes de substitution dans la kaolinite n'est pas à exclure totalement (BOLLAND et *al*, 1980 ; ESPIAU, 1986).

L'origine des charges permanentes peut également être trouvée dans les arrangements des constituants au sein des microagrégats kaolinite - oxydes de fer, au sein desquels diverses liaisons peuvent intervenir. Ces liaisons ne sont pas

que des interactions électrostatiques ou des forces de Van der Waals, mais surtout des liaisons chimiques de type métal - ligand - métal (CAMBIER, 1986). Il peut donc en résulter des déficits de charges dus à des ions non totalement coordonnés.

En conséquence, qu'il s'agisse des sites de la kaolinite prise seule ou des associations avec les oxydes, toutes les hypothèses se résolvent à la présence des charges variables et permanentes négatives dominant dans les sols de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

L'analyse des résultats de charges permanentes (tableau 3.2-4) indique par ailleurs qu'à $\text{pH} = \text{pH}_0$, l'aluminium est solubilisé dans tous les horizons des sols étudiés (tableau 3.2-4). Ce phénomène est examiné plus en détail dans la discussion portant sur les méthodes d'étude des charges de surface.

* * *

Au total, l'application de la méthode titrimétrique révèle que les deux sols présentent des CEC variables et permanentes : ce sont donc des *sols à charges mixtes*.

Les deux types de sol diffèrent surtout par des accroissements de charges variables ($\Delta\sigma_v$) plus importants dans le Niari que sur le plateau de Mbé-Batéké.

A teneurs en carbone organique identiques, les variations de charge nette sont attribuables à la texture des sols (argileuse dans la Vallée du Niari et sableuse sur le plateau de Mbé-Batéké).

Les horizons de surface se distinguent des horizons plus profonds par des pH_0 plus faibles et des valeurs de σ_v plus élevées.

Les charges permanentes restent peu influencées par le type de sol (ou la texture), la profondeur (ou la matière organique) et la mise en culture.

Dans la Vallée du Niari, la comparaison savane / culture montre une dégradation des paramètres considérés, à l'exception de σ_p qui se maintiennent au même niveau que sous savane.

Il ressort donc de cette étude de l'application de la méthode potentiométrique aux sols du Niari et de Mbé-Batéké, quatre groupes

comportementaux qui se distinguent en fonction de la texture d'une part et de la teneur en matière organique d'autre part.

Pour la suite, l'étude de la réactivité du complexe d'échange est limitée à un échantillon représentatif de chacun de ces quatre groupes. Ainsi ne sont retenus que les échantillons représentant la surface et la profondeur, respectivement :

- NC01 et NC04 pour le sol argileux de la Vallée du Niari,
- BS1 et BS4 pour le sol sableux du plateau de Mbé-Batéké.

3.2.3.6. Evolution des capacités d'échange anionique (CEA) et cationique (CEC)

Les mesures de l'adsorption ionique à différents pH ont été réalisées à partir d'une solution de CaCl_2 0,002 M.

La force ionique de la solution utilisée est égale à 0,006, valeur proche de celles indiquées pour des solutions de sols tropicaux acides (GILLMAN, 1991).

La figure 3.2-6 montre qu'il existe, aux bas pH :

- une CEC dite basique (CEC_B) représentée par l'adsorption de Ca^{2+} ,
- une CEC totale (CEC_T) correspondant à l'adsorption de $\text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+}$,
- une capacité d'échange anionique (CEA) exprimant l'adsorption de Cl^- .

La combinaison des trois courbes d'adsorption constitue ce que GILLMAN (1991) appelle «l'empreinte digitale des charges» ; celle-ci constitue un outil de prévision de la réaction du sol à l'acidification ou à sa correction.

3.2.3.6.1. Capacité d'échange cationique basique

Elle est d'une grande importance agronomique car elle exprime la limite supérieure de la capacité du sol à retenir des cations comme Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ (GILLMAN, 1991).

Pour le sol cultivé du Niari, à partir du pH du sol (PTN = 4,5) toute acidification se traduit par une chute rapide de la CEC basique dans l'horizon de surface : 3,1 cmol(+) kg^{-1} à pH = 4,5, 2,2 à pH 3,7 et 0,7 à pH 2,8.

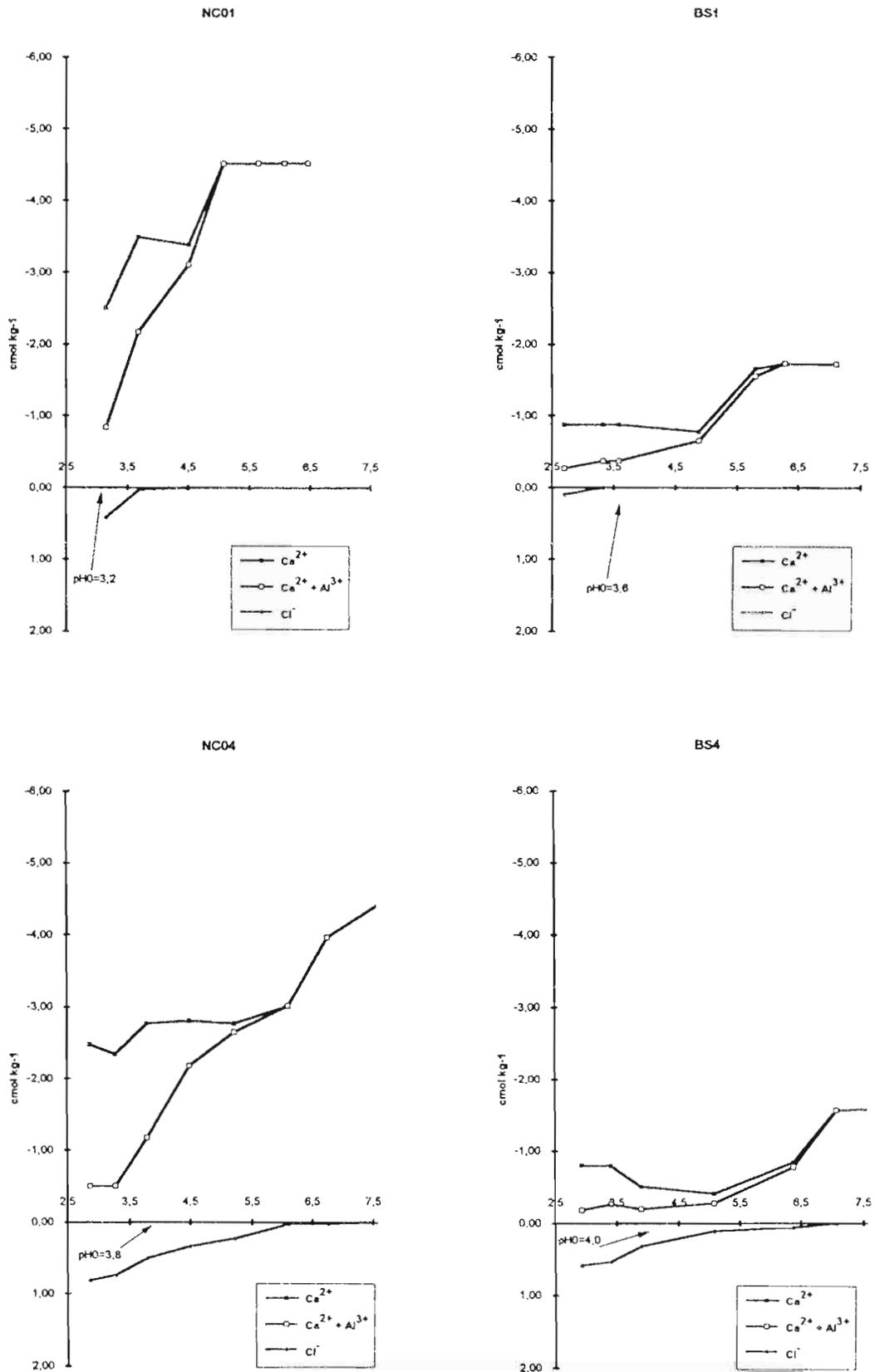


Figure 3.2-6 : Courbes d'adsorption cationique et anionique en fonction du pH de deux horizons de surface et de profondeur des sols de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

La correction de l'acidité entraîne une augmentation également rapide de la CEC_B qui passe à $4,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ à pH 5 où elle atteint son palier.

Dans l'horizon de profondeur, la CEC_B est plus faible à pH comparable : elle n'est que de $2,2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ à pH = 4,5. Elle décroît aussi avec l'acidification ($0,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ à pH = 2,9) et s'accroît avec la remontée du pH ($4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ à pH = 6,8), mais n'atteint pas de palier comme en surface, tout au moins jusqu'à pH 7,7 (limite de mesure).

Dans le **sol du plateau de Mbé-Batéké**, les courbes d'évolution de CEC basique des horizons de surface et de profondeur présentent une certaine analogie, mais avec des valeurs et des amplitudes de variations beaucoup plus faibles que dans le cas précédent. Dans l'horizon supérieur, l'accroissement sensiblement rapide de la CEC basique en fonction de l'élévation du pH se situe entre pH ≈ 5 et 6 où la CEC_B passe de $0,7$ à $1,6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. Le palier qui suit s'établit donc ici à une valeur de pH plus élevée que pour le sol de la Vallée du Niari (pH ≈ 6 contre pH ≈ 5 !).

Dans l'horizon de profondeur, la CEC_B représente la moitié de celle de l'horizon de surface jusqu'à pH ≈ 5 . Elle n'atteint $0,8 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ qu'à pH $\approx 6,5$ et le palier qui est également de $1,6 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ n'est atteint qu'au-delà de pH ≈ 7 (alors qu'il est atteint dès pH ≈ 6 en surface !).

3.2.3.6.2. Capacité d'échange cationique totale

L'évolution de la CEC_T en fonction du pH permet également d'apprécier la solubilisation de l'aluminium. La différence entre la CEC_T et la CEC_B correspond à l'aluminium présent sous forme échangeable aux pH très bas.

Lors de la saturation par les protons par exemple, les minéraux argileux subissent une hydrolyse qui se manifeste par la solubilisation du réseau, les cations de la couche octaédrique (alumineuse) passant en position d'ions échangeables ; au contact d'une solution saline, ces ions sont partiellement échangés en engendrant dans la solution une certaine acidité (CHAUSSIDON, 1979 ; ULRICH, 1991) selon la réaction



Cette équation explique notamment le comportement d'acide faible de ces constituants du sol. C'est de cette instabilité des argiles H^+ qui évoluent

rapidement en quelques jours en argile-Al que provient la forte participation de l'aluminium dans l'acidité des sols aux pH inférieurs à 5 (BRUCKERT et ROUILLER, 1979).

Dans le **sol du Niari**, les charges occupées par l'aluminium qui atteignent en surface 72% à pH 2,8 mais ne sont plus que de 38% à pH 3,7 et de 8% à pH 4,5 avant de s'annuler à pH 5.

Dans l'horizon de profondeur, ces proportions sont de 80% à pH 2,8 , 58% à pH 3,8 et de 22% à pH 4,5 pour s'annuler à pH 6.

Dans le **sol du plateau de Mbé-Batéké**, l'aluminium représente 70% des charges négatives totales à pH 2,8 , 58% à pH = 3,6 , 16% à pH 5 et 6% à pH = 5,8 . L'aluminium ne disparaît du complexe échangeable qu'à partir de pH \approx 6,3 dans l'horizon humifère (BS1).

En profondeur (BS4), les taux sont de 77% à pH = 2,8 , de 62% à pH 4 , 32% à pH = 5 et 8% à pH = 6,4.

Il apparaît ainsi que l'aluminium est présent sur le complexe d'échange des sols étudiés et plus particulièrement dans le sol du plateau de Mbé où il se manifeste même à des valeurs de pH relativement élevées, de l'ordre de 6. Ce phénomène est à lier vraisemblablement à la présence de gibbsite dans ce dernier sol.

3.2.3.6.3. Capacité d'échange anionique

L'analyse de l'évolution de la CEA révèle qu'en surface, les charges positives n'existent pas aux valeurs usuelles de pH couramment rencontrées dans ces sols.

Dans le **sol du Niari**, elles n'apparaissent qu'à partir de pH = 3,7 où elles sont de 0,04 cmol(-) kg⁻¹ et atteignent 0,6 cmol(-) kg⁻¹ à pH = 2,8. Il n'y a pas inversion du signe de la charge globale et la rétention des anions n'apparaît qu'en profondeur avec une CEA de 0,3 cmol(-) kg⁻¹ à pH = 4,5. Celle-ci augmente avec l'acidification : 0,5 cmol(-) kg⁻¹ à pH 3,8 et 0,8 cmol(-) kg⁻¹ à pH 2,9. En cas de remontée du pH, cette CEA est encore perceptible et s'annule à pH \approx 6,8.

Dans le **sol du plateau de Mbé-Batéké**, la CEA est quasi nulle en surface et n'apparaît qu'à pH = 2,7 où elle n'est que de 0,1 cmol(-) kg⁻¹ . En profondeur,

la CEA existe à toutes les gammes de pH. Elle augmente de 0,1 cmol(-) kg⁻¹ à pH 5 jusqu'à 0,6 cmol(-) kg⁻¹ à pH 2,9. La CEA diminue avec l'augmentation du pH, mais ne s'annule jamais : 0,06 cmol(-) kg⁻¹ à pH 6,4 et 0,01 cmol(-) kg⁻¹ à pH 7,9.

Il semble ainsi que les charges positives naturelles sont vraisemblablement bloquées par les anions organiques dans les horizons supérieurs humifères.

3.2.3.7. Discussion et conclusion : comparaison des méthodes d'étude des charges du sol utilisées

Le tableau 3.2-5 permet de comparer les valeurs de capacités d'échange cationique obtenues par différentes méthodes.

Tableau 3.2-5 : Valeurs de pH d'équilibre, de charge négative totale (charges variable nette + permanentes par titrimétrie dans CaCl₂ 0,002 M), de CEC mesurée par la méthode à la cobaltihexammine et de CEC mesurée par adsorption d'ions (avec CaCl₂ 0,002 M).

Echantillons		pH _{eau}	PTN	pH _{Co}	($\sigma_v + \sigma_p$)	CEC _{Co}	CEC _{Ca}
		cmol(+) kg ⁻¹					
sous	BS1	4,6	4,9	4,5	3,8	0,9	0,8
	BS2	4,7	5,1	4,7	3,5	0,4	-
	BS3	4,8	5,1	4,9	3,5	0,3	-
	BS4	4,8	5,1	5,1	3,4	0,3	0,3
savane	NS1	5,0	5,8	4,7	9,5	6,1	-
	NS2	4,7	4,6	4,3	3,6	2,5	-
	NS3	4,6	5,0	4,4	5,0	2,7	-
	NS4	4,5	4,9	4,5	3,8	2,4	-
culture	NC01	4,4	4,5	4,1	5,6	4,6	4,5
	NC02	4,4	4,5	4,2	3,7	4,5	-
	NC03	4,8	4,4	4,1	3,5	3,6	-
	NC04	4,7	4,5	4,3	3,5	2,7	2,8

pH_{eau} = pH mesuré à l'eau (rapport 1/2,5), PTN = pH au point de titrage nul (dans CaCl₂ 0,002 M, rapport 1/10), pH_{Co} = pH de l'extrait à la cobaltihexammine (rapport 1/20).

σ_v = charge variable nette et σ_p = charge permanente

CEC_{Co} = capacité d'échange cationique déterminée à la cobaltihexammine

CEC_{Ca} = CEC mesurée au PTN, dans CaCl₂ 0,002 M.

Il apparaît que les valeurs de capacité d'échange obtenues par mesure de l'adsorption cationique au pH du sol, soit avec CaCl_2 0,002 M (CEC_{Ca}), soit avec la cobaltihexammine (CEC_{Co}) sont équivalentes, tout au moins pour les échantillons considérés.

En fait, il s'agit du pH correspondant au PTN avec CaCl_2 0,002 M et à pH_{Co} (avec la cobaltihexammine). En effet, comme le signale ESPIAU (1986), il ne faut pas perdre de vue que la mise en contact d'un échantillon de sol avec une solution d'électrolyte conduit à un pH d'équilibre qui est différent des solutions du sol dont la force ionique est plus faible que celles des réactifs utilisés.

Ainsi, l'observation des courbes d'adsorption cationique en fonction du pH (fig. 3.2-6) corrobore t-elle celles faites au chapitre 2, avec des valeurs de capacités d'échange cinq à neuf fois plus élevées pour le sol de la Vallée du Niari que pour celui du plateau de Mbé-Batéké.

On note que les valeurs de charge négative totale obtenues par la méthode titrimétrique (somme des charges variable nette et permanente) sont systématiquement beaucoup plus élevées, traduisant donc une surestimation.

Cette surestimation de la charge négative pourrait être attribuée à un certain nombre d'inconvénients dans la détermination aussi bien de σ_v que de σ_p (Espiau, 1986).

Le mode de construction des courbes introduit un premier biais car on considère que la charge est nulle au PTN, quelle que soit la concentration de l'électrolyte.

Un second biais est introduit en considérant que les H^+ et OH^- disparaissant de la solution *participent tous* à la création de charges de surface, ce qui n'est pas le cas.

La dissolution des oxydes aux bas pH consomme des protons sans créer des charges positives, surestimant ainsi l'adsorption des protons (SCHULTHESS et SPARKS, 1986 ; MARCANO-MARTINEZ et McBRIDE, 1989). De façon similaire, la dissolution des minéraux et de la matière organique aux pH élevés consomme des OH^- . D'après PARKER et al (1979), 30 à 90% des H^+ et des OH^- apportés peuvent ainsi être chimisorbés (c'est-à-dire établir des liaisons chimiques) sans participer à la création de charges. Enfin des H^+ peuvent se substituer aux cations indifférents saturant les sites de charge permanente, d'autant plus aisément que la force ionique de la solution de titrage est faible.

Tout ceci pose le problème de l'équivalence des charges et conduit à

des incertitudes sur pH_0 et, partant sur σ_v et σ_p .

Dans les cas considérés ici, au niveau des σ_p , la pression des H^+ se traduit par une solubilisation importante de l'aluminium. En effet, le tableau 3.2-4 montre qu'à $pH = pH_0$, l'occupation des sites d'échange par les ions Al^{3+} augmente avec la profondeur de 55 à 63% des charges négatives totales dans le sol cultivé de la Vallée du Niari (NC0) et de 30 à 54% pour le sol sous savane du plateau de Mbé-Batéké (BS). Par contre, celle-ci diminue de 67 à 42% dans le sol sous savane de la Vallée du Niari (NS).

En définitive, les deux méthodes utilisées pour étudier les variations de charge du complexe des sols acides de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké, ne donnent évidemment pas les mêmes paramètres comme l'ont déjà fait remarquer d'autres auteurs (UEHARA et GILLMAN, 1981 ; ESPIAU, 1986, 1987 et 1994 ; MARCANO-MARTINEZ et McBRIDE, 1989 ; GILLMAN, 1994).

La méthode potentiométrique a l'avantage d'être relativement rapide ; elle est surtout intéressante pour l'étude du pouvoir tampon des sols, en considérant la variation du pH en fonction des ions H^+ et OH^- apportés au contact du sol. Cette méthode permet de *caractériser le type de système d'échange* et de comparer différents échantillons pour un type de sol donné. Les inconvénients qui viennent d'être notés en limitent cependant la validité et lui font préférer la méthode par échange ionique qui, elle, mesure la capacité d'adsorption effective des cations et anions dont la variation en fonction du pH permet de *caractériser un comportement général du système d'échange*.

Dans l'adsorption d'ions, la charge au PTN est mesurée directement. Elle reste cependant une donnée relative, car dépendant de la concentration de l'électrolyte (ESPIAU, 1987).

La capacité d'échange est mesurée par l'adsorption du Ca^{2+} de l'électrolyte de contact. Ici aussi, quelques problèmes sont signalés dans la littérature, notamment le fait qu'il existe une compétition ionique entre Ca^{2+} , H^+ apportés et Al^{3+} dissous, pour la saturation des charges permanentes aux faibles concentrations en électrolyte (ESPIAU, 1986). De plus, les charges étant déterminées en considérant la concentration des ions simples en solution (Ca^{2+} , Cl^-), les résultats peuvent être entachés d'erreurs quand on sait que des paires d'ions tels que $CaCl^+$ sont souvent adsorbées (SPOSITO, 1984).

En dépit de ces inconvénients, qui **rendent plutôt compte de la difficulté de l'étude du complexe adsorbant des sols à charges mixtes**, les résultats obtenus permettent de mieux comprendre le comportement des sols étudiés.

Les deux méthodes potentiométrique et ionique concordent, pour les deux sols étudiés, en ce que les charges nettes déterminées par mesure de l'adsorption ionique restent négatives et ne sont pas nulles au pH_0 .

La concordance des CEC mesurées par adsorption ionique à $pH = pT_N$ et $pH = pH_{C0}$, rend compte de l'ambiguïté de la notion de «CEC au pH du sol», bien que les différences de pH d'équilibre soient légères.

* * *

En CONCLUSION de ce chapitre sur la caractérisation du complexe d'échange, il ressort que la *kaolinite désordonnée* reste le phyllosilicate dominant dans les deux sols, argileux de la Vallée du Niari et sableux du plateau de Mbé-Batéké.

Du point de vue **minéralogique**, les deux types de sol étudiés diffèrent par l'absence de traces d'interstratifiés 2:1 dans le sol du plateau de Mbé-Batéké, tandis que c'est la gibbsite qui est absente dans le sol de la Vallée du Niari. L'aluminium que l'on retrouve alors sous forme libre (extraction au CBD), échangeable (méthode à la cobaltihexammine) et/ou dissous (acidification par apport de H^+) proviendrait donc vraisemblablement moins des hydroxopolymères d'aluminium (ESPIAU et , 1980) que des complexes silicoalumineux, des argiles ou des micas (ESPIAU, 1986).

Les teneurs plus élevées en alumine libre dans l'horizon de surface du sol de la Vallée du Niari et sa faible représentativité sur le complexe d'échange suggèrent que cet élément est sûrement complexé par la matière organique issue du chevelu racinaire sous savane à *Hyparrhenia diplandra*.

Dans le cas du sol de la Vallée du Niari, la prise en compte de la mise en culture permet de constater que la dégradation se répercute aussi sur la minéralogie (composition chimique).

L'étude de la **réactivité du complexe** adsorbant des sols a permis de

montrer que des différences existent, certes, mais les caractéristiques essentielles convergent toutes : minéralogie se traduisant par des charges variables et permanentes, acidité, présence d'aluminium dissous aux pH bas.

Les résultats ainsi obtenus (présence de pH_0 , de charges variables et permanentes) permettent de conclure que ces sols apparaissent comme un système hybride, constitué par un **mélange de composés à charges permanentes et variables** (UEHARA et GILLMAN, 1980 et 1981 ; HERBILLON, 1988).

Des conséquences pratiques peuvent alors être tirées des résultats obtenus.

L'étude de l'accroissement moyen de ce qui a été considéré comme charge variable nette du sol ($\Delta\sigma_v$) entre pH 4,5 et 6,0 conforte les premières conclusions de ce travail, à savoir :

- la modification des propriétés physico-chimiques du sol par suite de la mise en culture, celle-ci affectant surtout les horizons superficiels,
- le rôle important joué dans le comportement du complexe d'échange par la matière organique.

Le point de charge nulle (pH_0) ne reflète pas les différences de granulométrie ni de minéralogie des deux sols argileux et sableux étudiés ici. Des différences notables apparaissent lorsque l'on considère le paramètre $|pH_0 - pTN|$. Cette prise en compte du pH du sol au moment considéré (PTN) montre qu'il est impérieux de maintenir le pH à des valeurs «correctes» permettant au sol d'avoir une charge variable négative prédominante, donc de **corriger l'acidité**.

L'analyse de l'évolution des CEC en fonction du pH montre des différences très nettes entre les horizons étudiés et fait ressortir d'une part l'effet texture du sol et d'autre part teneur en matière organique. De plus, il faut, pour à la fois minimiser la solubilisation de l'aluminium et atteindre le palier de CEC maximale, que le pH (dans $CaCl_2$ 0,002 M) soit au-delà 5,1 et de 5,8 pour l'horizon de surface, respectivement du sol du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Ces valeurs dépassent celles du PTN, respectivement 4,5 et 4,9 et permettant de conclure également à la **nécessité de corriger l'acidité du sol**.

Cette analyse révèle en outre que l'aluminium est solubilisé jusqu'à pH 6 - 6,5 dans le sol du plateau de Mbé-Batéké, tandis qu'il ne l'est qu'en deçà de

pH 5 dans celui de la Vallée du Niari. Cette observation conforte les conclusions tirées au chapitre 2 concernant les *risques plus importants de toxicité aluminique* dans les sols du plateau de Mbé-Batéké. Les méthodes d'étude de la CEC doivent impérativement tenir compte la présence de l'aluminium sur le complexe.

Les charges positives naturelles du sol ont une grande implication dans la rétention des nitrates ; celles-ci, vraisemblablement bloquées par les anions organiques, n'existent pratiquement pas au pH du sol dans les horizons de surface ; il en résulte des risques non négligeables de pertes de nitrates par lixiviation. Par contre, l'existence d'une CEA dans les horizons plus profonds, donc une rétention potentielle des nitrates, peut compenser ce phénomène, surtout pour les plantes dont l'enracinement est relativement profond.

Cette caractérisation permet de *mieux prévoir les opérations à mener dans le cadre de la gestion de ces sols* : il s'agit de *sols à charges variables et permanentes qui ne peuvent pas être manipulés par simple modification de la concentration de la solution du sol* (UEHARA et GILLMAN, 1981 ; GILLMAN, 1991), par des apports d'engrais par exemple.

La gestion de ces sols implique donc de :

- relever le pH par l'apport de calcaire,
- abaisser le pH_0 par l'apport de matière organique et/ou de phosphates.

La mise en oeuvre est délicate car théoriquement l'augmentation du pH ouvre de nouveaux sites d'échange, donc les possibilités de rétention des cations, milite en défaveur du stockage des anions tout aussi importants que les nitrates.

Aussi apparaît-il nécessaire d'étudier les réponses effectives du sol à l'apport de produits utilisés dans la correction de l'acidité.

INFLUENCE DES APPORTS
DE CALCAIRE BROYE ET DE *PUERARIA JAVANICA*
SUR LA REACTION ET LE COMPLEXE D'ÉCHANGE DES SOLS
DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU DE MBE-BATEKE

«Si vous voulez comprendre comment quelque chose change, il faut changer ce quelque chose». BOX G.E.P., HUNTER W.G. et HUNTER J.S., 1978 - Statistics for experimenters. New York, Wiley.

La nécessité d'une correction de l'acidité des sols de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké est clairement apparue dans les chapitres précédents. Il convient à présent d'étudier, en conditions contrôlées de laboratoire, l'influence de l'apport de calcaire broyé associé ou non à l'incorporation du *Pueraria javanica*, sur les propriétés physico-chimiques du sol, en particulier sur la réaction et le complexe d'échange.

L'étude porte, pour chacun des deux sols, sur l'horizon de surface (0-10 cm), directement concerné par les apports réalisés.

Dans une première phase, après un rappel sur la nécessité de la correction de l'acidité, trois essais d'ordre méthodologique sont menés :

- le premier essai est destiné, sur la base du pouvoir tampon des sols, à estimer des doses de calcaire susceptibles de remonter le pH à des valeurs «convenables» ;

- le second teste les doses théoriques grâce à une incubation de mélanges sol/calcaire, durant six semaines en laboratoire, les valeurs de pH obtenues étant ensuite confrontées aux valeurs théoriques ou attendues du pouvoir tampon ;

- le troisième concerne le choix d'une méthode de détermination des cations échangeables dans le cas d'échantillons de sol acide ayant reçu du calcaire broyé.

Cet ensemble d'essais liminaires permet de retenir les dispositions méthodologiques appliquées dans cette approche expérimentale. L'essai d'incubation proprement dit, qui dure douze semaines est destiné à préciser les modalités et les conséquences de l'action du calcaire broyé de Madingou en présence ou non de matière végétale.

4.1. CORRECTION DE L'ACIDITE PAR DES AMENDEMENTS CALCAIRES

4.1.1. NECESSITE DE CORRECTION DE L'ACIDITE

L'acidité du sol détermine en définitive la composition de la solution du sol et, partant, la disponibilité des éléments du sol pour les plantes. Ce fait est illustré par la figure 1.1-3 (Cf §1.1) et par le tableau 4.1-1 qui présente quelques réactions pouvant avoir lieu entre les ions H^+ et les colloïdes minéraux du sol.

Il est donc indispensable de corriger l'acidité et ses conséquences défavorables au triple point de vue physique, chimique et biologique résultant de la dégradation du sol.

Les effets de l'acidité sur les plantes cultivées étant également indirects (COPPENET *et al*, 1986), les remèdes visent à :

- corriger les déséquilibres nutritionnels, assurer une bonne garniture cationique du complexe d'échange, améliorer la structure ;
- relever le pH, pour favoriser l'activité biologique, l'assimilabilité des principaux éléments nutritifs pour les plantes (Cf §1.1), augmenter la CEC en agissant sur le paramètre $pH_0 - pH$ (Cf §3.2) et minimiser la solubilisation de l'aluminium.

Si pour rétablir les équilibres minéraux, des apports d'engrais, d'oligo-éléments et de gypse peuvent suffire (SUMNER *et al*, 1986), il apparaît, dans tous les autres cas, la nécessité d'utiliser des amendements calcaires ou calcomagnésiens (SINGH *et SINGH*, 1985).

Tableau 4.1-1 : Effet de l'acidité sur quelques réactions pour les éléments importants du sol en nutrition des plantes (d'après SUMNER *et al*, 1991).

Elément	Réaction avec H ⁺
N	$R-NH_2 + 2O_2 \rightarrow R-OH + H^+ + NO_3^-$ $2HNO_3 + 10H^+ \rightarrow N_2 + 6H_2O$
P	$Sol-Fe(OH)_3 + H^+ + H_2PO_4^- = SolFePO_4 \cdot 2H_2O + H_2O$ $Ca_5(PO_4)_3OH + 7H^+ = 5Ca^{2+} + 3H_2PO_4^- + H_2O$
K	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2 + 10H^+ = K^+ + 3Al^{3+} + 3H_4SiO_4^0$
Ca	$CaCO_3 + 2H^+ = Ca^{2+} + H_2O + CO_2$
Mg	$MgCO_3 + 2H^+ = Mg^{2+} + H_2O + CO_2$ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot 2H_2O + 6H^+ = 3Mg^{2+} + 4H_4SiO_4^0$
S	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6 + 6H^+ = K^+ + 3Al^{3+} + 2SO_4^{2-} + 6H_2O$ $R-SH_2 + 2O_2 \rightarrow R + 2H^+ + SO_4^{2-}$
Cu	$Sol-Cu + 2H^+ = Cu^{2+} + Sol-2H$
Zn	$Sol-Zn + 2H^+ = Zn^{2+} + Sol-2H$
Mn	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- = Mn^{2+} + 2H_2O$
Fe	$Sol-Fe(OH)_3 + 3H^+ = Fe^{3+} + 3H_2O$ $Sol-Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- = Fe^{2+} + 3H_2O$
B	$Sol(Al,Fe)O-H_2BO_3 + H_2O + H^+ = Sol(Al,Fe)O-OH_2^+ + H_3BO_3$
Mo	$2Fe(OH)_3 + 3MoO_4^{2-} + 6H^+ = Fe_2(MoO_4)_3 + 6H_2O$
Si	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 6H^+ = 2Al^{3+} + 2H_4SiO_4^0 + H_2O$
Al	$Al(OH)_3 + 3H^+ = Al^{3+} + 3H_2O$
CEC/CEA	$Sol-O^- + H^+ = Sol-OH^0 + H^+ + Sol-OH^{2+}$
Echange	$Sol-M^{n+} + nH^+ = Sol-H_n^+ + M^{n+}$

Dans les deux contextes, il est important d'assurer une bonne gestion de la matière organique, d'une part pour son rôle de pourvoyeur d'éléments nutritifs (DUXBURY *et al*, 1989) et de complexation des éléments toxiques (HARGROVE et THOMAS, 1981 ; AHMAD et TAN, 1986) et, d'autre part en raison de son rôle dans l'expression des charges variables (SANCHEZ 1976 ; TATE et THENG, 1980 ; OADES *et al*, 1989 ; SANCHEZ *et al*, 1989) évoquées précédemment (Cf §2.2).

La remontée du pH à des valeurs optimales par les amendements calcaires et calcomagnésiens pose le problème de la détermination des doses à apporter.

4.1.2. DETERMINATION DES DOSES : INSUFFISANCE DES CRITERES HABITUELS

Comme cela est apparu lors de l'étude des variations de la capacité d'échange en fonction du pH, l'aluminium est solubilisé aux bas pH (Cf §3.2). Sa disponibilité s'accroît à tel point que celui-ci peut occuper une part importante du complexe d'échange et être toxique pour les plantes cultivées.

En raison de ce rôle attribué à l'aluminium vis-à-vis de l'acidité et des qualités agronomiques des sols tropicaux (COLEMAN et THOMAS, 1967 ; EVANS et KAMPRATH, 1970 ; HARGROVE et THOMAS, 1982 ; FOY, 1984), les méthodes de détermination des doses d'amendements calcaires les plus couramment utilisées sont basées sur les teneurs de cet élément dans le sol (SHOEMAKER et *al*, 1961).

Les principales méthodes tenant compte de la concentration en Al^{3+} dit «échangeable», extrait par $KCl M$ sont les suivantes :

- méthode de KAMPRATH ou «méthode brésilienne»

$$CaCO_3 = 1,5 Al^{3+} \text{ (en cmol(+))}.$$

- méthode «hawaïenne» :

$$CaCO_3 = 1,4 (\text{acidité d'échange} - CAS \times CECE/100) \text{ en cmol(+)} \text{ kg}^{-1}$$

où CAS = niveau critique en Al^{3+} échangeable auquel la culture est sensible et

CECE = capacité d'échange cationique "effective".

- méthode de COCHRANE et *al* (1980) :

$$Ca/100g \text{ de sol} = 1,5 [(Al^{3+} - RAS(Al^{3+} + Ca^{2+} + Mg^{2+}))/100]$$

Al^{3+} , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimés en $cmol(+)$ kg^{-1} de sol et RAS = Required

Al Saturation (taux de saturation en Al recherché).

L'examen de ces formules suscite quelques remarques.

La première méthode, d'une utilisation très aisée, ne nécessite que le dosage de l'aluminium extrait par le $KCl M$; mais la mesure de l'aluminium échangeable par extraction avec une solution saline est indubitablement sujette à quelque ambiguïté (AMEDEE, 1974).

Le problème essentiel est celui qui résulte de la nature même des ions aluminium en solution (ESPIAU et PEDRO, 1980). Certains auteurs pensent que l'aluminium extrait au $KCl M$ est bien de l'aluminium échangeable Al^{3+} (ESPIAU et PEYRONEL, 1976 ; ROUILLER et *al*, 1980 ; COCHRANE et *al*, 1980 ; ESPIAU et

PEDRO, 1980 ; MANRIQUE, 1986), d'autres par contre estiment que cet aluminium n'est pas strictement échangeable et préfèrent parler *d'aluminium extractible* au KCl M (SANCHEZ, 1976 ; PAVAN *et al*, 1982 ; OATES et KAMPRATH, 1983).

Dans cette méthode, dite «brésilienne» ou de KAMPRATH (1970), le coefficient de neutralisation de Al^{3+} par Ca^{2+} est de 1 pour les sols dont la teneur en matière organique est inférieure à 2% et de 1,5 lorsque celle-ci est comprise entre 2 et 7%. DABIN (1985) propose un ajustement de cette méthode en estimant que les apports d'amendement calcique doivent se faire sur la base de deux fois la teneur en Al^{3+} échangeable. En effet, il est important d'apporter suffisamment de calcaire pour échanger sur le complexe Al^{3+} par Ca^{2+} , neutraliser l'acidité des ions hydroxy-aluminium et les insolubiliser. Toutefois, comme le soulignent HARGROVE et THOMAS (1984) puis RITCHIE (1989), l'aluminium complexé avec la matière organique n'est pas extrait par KCl M, mais il est capable de réagir avec un amendement calcique.

Les deux méthodes suivantes font appel à des notions plus ou moins controversées ou difficiles à apprécier ; les risques d'intoxication des plantes sont appréciés soit par considération des teneurs absolues en Al^{3+} , soit par un certain nombre de paramètres dont le plus connu est le taux de saturation en aluminium (TSA = $100\text{Al}/\text{SBE} + \text{Al}$) de KAMPRATH (1970). COCHRANE *et al* (1980) signalent qu'à des TSA identiques ne correspondent pas toujours des teneurs en aluminium identiques bien que celles-ci soient toujours faibles jusqu'à un TSA d'environ 60%. Le TSA est donc un paramètre indicatif mais pas une référence absolue pour préjuger de la concentration ou du seuil de toxicité aluminique : EVANS et KAMPRATH (1970) trouvent ainsi que le maïs tolère un TSA de 70% tandis que le soja se limite à 30%.

Par ailleurs, les causes physiologiques de la toxicité de l'aluminium ne sont pas bien connues. Le problème est compliqué par le fait que l'aluminium peut se trouver sous de nombreuses formes dans le sol et que toutes ces formes n'ont pas le même effet toxique sur les plantes : ainsi, les Monocotylédones seraient plus sensibles à Al^{3+} , tandis que les Dicotylédones le seraient à AlOH^{2+} . Ces réactions de la plante à l'acidité du sol varient d'une espèce à une autre et, au sein d'une même espèce, selon la variété (BROOKE *et al*, 1989 ; RITCHIE, 1989 ; SCOTT et

FISHER, 1989 ; MARSCHNER, 1991 ; TAN et *al*, 1993).

L'utilisation de paramètres tels que *CAS* ou *RAS* pourrait donc conduire à de fâcheuses erreurs, si leur validité n'a pas été précisément vérifiée pour des sols bien définis.

La toxicité aluminique, surtout étudiée en culture hydroponique, est plus corrélée à l'activité des ions en solution qu'à leur concentration (ADAMS et LUND, 1966 ; BLOOM et *al*, 1979 ; PAVAN et *al*, 1982 ; NOBLE et SUMNER, 1988 ; NOBLE et *al*, 1988). Les formes réputées toxiques sont AlSO_4^+ , AlOH^{2+} , $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, auxquelles s'ajoute le polymère Al_{13} qui serait le plus toxique mais dont la présence dans la solution du sol n'est pas prouvée. Cependant, BOURRIE (1990) estime que le complexe Al_{13} , forme polynucléaire de Al(III) aqueux, est important ou prépondérant dans les conditions de la surface et à pH compris entre 5 et 8, où il augmente la mobilité de Al dans les paysages et tamponne les variations de l'activité de Al^{3+} liées aux hydrolyses en solution.

En outre, les problèmes de spéciation de l'aluminium sont complexes en raison de la diversité des méthodes et les différences dans les portions de pool d'aluminium analysées par chacune d'elles (HODGES, 1987). ESPIAU (1987) rapporte ainsi qu'au-dessous de pH 4 l'aluminium total tend à n'exister en solution que sous la forme Al^{3+} , et qu'entre pH 4,5 et 6, c'est l'ion $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ qui prédomine. Lors de l'hydrolyse de l'aluminium, AlOH^{2+} se forme à pH = 5,01, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ à pH = 5,1 et $\text{Al}(\text{OH})_3$ à pH = 6,7 (Cf §1.1 ; NORDSTROM et MAY, 1989 ; CAMBIER, 1994, *communication personnelle*).

C'est ainsi que AMEDEE et PEECH (1976) pensent que l'extraction au *KCl M* n'est pas satisfaisante et concluent que la quantité de Al(III) extraite par le *KCl M* ne représente pas une propriété intrinsèque des sols acides des tropiques humides.

Il est en outre difficile de concilier les résultats concernant les **quantités d'aluminium extraites** par différentes solutions car, comme cela a été évoqué au chapitre 3, celles-ci **dépendent du pH, du type de cation et de sa concentration, ainsi que de son pouvoir tampon relativement à celui du sol** (OATES et KAMPRATH, 1983 ; RITCHIE, 1989).

Toutes ces remarques ne militent pas en faveur d'une correction basée uniquement sur les seules teneurs en aluminium. En effet, il a été signalé au § 1.1 qu'il est difficile, dans une situation donnée, de déterminer si les problèmes de croissance des plantes aux pH bas sont dus à une ou plusieurs toxicités et/ou carences en différents éléments minéraux.

L'existence de plusieurs méthodes de détermination conduit souvent à une variation importante des doses requises pour un même sol. De plus, les sols tropicaux acides étant réputés pour leur absence de réponse aux amendements calciques (SANCHEZ, 1976), la faible réponse des cultures et l'absence de remontée substantielle du pH des sols tropicaux acides suggèrent ainsi la **nécessité de critères plus précis pour la détermination des doses** à apporter dans ces sols fortement désaturés (JUO et UZU, 1977).

Une méthode mieux adaptée a donc été recherchée en prenant en compte **l'ensemble des mécanismes permettant au sol de s'adapter progressivement à toute variation du pH**, et donc la neutralisation de l'acidité totale qui englobe les charges variables dues aux sites acides de surface (ROUILLER *et al*, 1980 ; RITCHIE, 1989).

Cette méthode de détermination des doses requises est basée sur l'étude du pouvoir tampon du sol, et **se réfère également aux résultats obtenus précédemment sur la variation de la capacité d'échange en fonction du pH** (Cf chapitre 3).

4.1.3. UTILISATION D'UNE METHODE BASEE SUR LE POUVOIR TAMPON DU SOL

Le pouvoir tampon est important pour deux raisons principales : il *prévient des brutales fluctuations de pH*, néfastes aux plantes supérieures et aux microorganismes du sol, et *influence la quantité de produits* comme le calcaire et le soufre ajoutés au sol pour en modifier le pH (BRADY, 1990).

Le pouvoir tampon, défini comme la quantité d'acide fort ou de base forte nécessaire pour faire varier le pH d'une certaine valeur est un paramètre convenable d'évaluation du pH d'équilibre de solutions aqueuses et de minéraux (VAN BREEMEN et WIELEMAKER, 1974). Cette résistance à la variation du pH peut être simplement expliquée en termes d'équilibre existant entre les types d'acidité

du sol (BRADY, 1990) et mieux, par les propriétés de charges variables (RITCHIE, 1989).

Les courbes de titrage, illustrant les deux facteurs intensité (pH et saturation en bases du complexe) et capacité (quantité de H^+ ou OH^- ajoutées), permettent de calculer les doses d'unités neutralisantes requises pour atteindre un pH donné.

Le pouvoir tampon est étudié pour les horizons de surface du sol de la Vallée du Niari (NC01) et du plateau de Mbé (BS1).

4.1.3.1. Mode opératoire pour l'étude du pouvoir tampon des sols

Afin de permettre la comparaison des résultats de ce travail avec les mesures de pH du sol réalisées classiquement en France et au Congo, les analyses qui vont suivre sont faites selon la norme française NFX 31-104 (AFNOR, 1994) : *le rapport sol/solution est de 1/2,5 et l'électrolyte support est une solution normale de chlorure de potassium.*

Le mode opératoire consiste en une mise en contact prolongé (48 h) de 10 g de sol tamisé à 2 mm avec des solutions de volume constant (25 mL) et de concentration constante en KCl (M) mais de titres croissants en NaOH (alcalinisation) ou HCl (acidification), comme le montre le tableau 4.1-2.

Comme pour l'étude des charges variables, cette mise en équilibre se justifie mieux que le titrage à la burette en raison des effets cinétiques qui font qu'à *vitesse rapide, la dissolution des minéraux silicatés peut consommer plus de H^+* lors de l'addition d'un acide fort (VAN BREEMEN, 1991).

Au bout de la période de contact avec agitations intermittentes, le pH de la suspension est mesuré.

Tableau 4.1-2 : Protocole de préparation des solutions d'équilibre pour l'étude du pouvoir tampon des sols.

n° d'ordre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prise d'essai (g)	<----- 10 ----->									
KCl 1,67 N (mL)	<----- 15 ----->									
NaOH 0,1 N (mL)	0,0	0,5	1,25	2,5	3,75	5,0	6,25	7,5	8,75	10,0
H ₂ O distil. (mL)	10	9,5	8,75	7,5	6,25	5,0	3,75	2,5	1,25	0,0
Volume total (mL)	<----- 25 ----->									
Caractéristiques théoriques des solutions de contact										
Titre en KCl (N)	<----- 1 ----->									
Titre en NaOH (N)	0,0	0,002	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040
cmol kg ⁻¹	0,0	0,50	1,25	2,50	3,75	5,0	6,25	7,50	8,75	10,0
pH estimé(*)	7,0	11,3		12,0		12,3		12,5		12,6
pH mesuré	6,7	10,9	11,5	11,8	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6
Valeurs de pH obtenues avec le sol (à 25°C)										

* pH de la solution = 14 - log C pour une base forte,

pH = - log C pour un acide fort,

avec C = concentration en N ; il n'est pas tenu compte de l'effet de sel dû à KCl M.

Les valeurs de pH mesuré sont obtenues après préparation des solutions de contact selon les proportions retenues.

4.1.3.2. Résultats et discussion

4.1.3.2.1. Pouvoir tampon du sol

Les écarts de pH observés entre les valeurs théoriques et celles mesurées dans les solutions de contact («blancs») sont négligeables (bas du tableau 4.1-2), ce qui prouve que les résultats obtenus sont très fiables et reproductibles.

On note que les courbes de pH des suspensions de sol obtenues pour le sol cultivé du Niari sont parallèles et peu différentes de celles de la savane de Mbé-Batéké, sauf dans le cas d'ajouts de fortes quantités de OH^- où de légères fluctuations peuvent être observées.

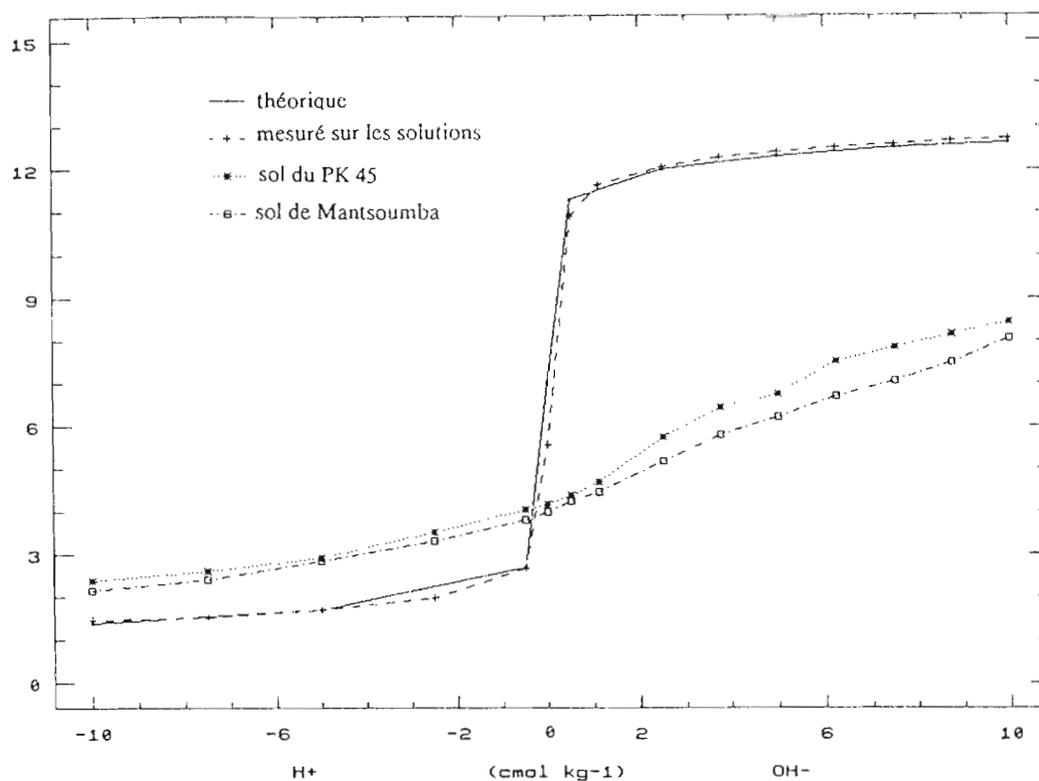


Figure 4.1-1 : Détermination des doses d'amendement : pH théorique, pH mesuré sur les blancs de contact et sur les suspensions du sol en fonction des apports de H^+ ou OH^- .

Les points d'inflexion observés sur les courbes sont dus à la neutralisation de plusieurs sources d'acidité. Celles-ci sont plus faibles pour le sol sableux du plateau de Mbé qui résiste moins à l'élévation du pH.

La figure 4.1-1 montre également que des différences apparaissent entre les courbes obtenues ici (avec une solution de $\text{KCl } M$) et celles du titrage

dans CaCl_2 0,002 M réalisées précédemment au chapitre 3.

Ces différences illustrent bien le fait que le pouvoir tampon est un phénomène complexe lié, tout comme les charges variables, aux ions en solution, à la matière organique et aux multiples réactions de dissociation des complexes hydroxylés du fer et de l'aluminium, génératrices de protons.

Pour la détermination des doses de calcaire, à partir du PTN, seule la section «alcalinisation» des courbes potentiométriques est prise en compte sur la figure 4.1-1.

4.1.3.2.2. Doses théoriques de calcaire

Le tracé des courbes de neutralisation de l'acidité du sol permet de déterminer les apports à réaliser pour atteindre une valeur de pH donnée.

La conversion des équivalents OH^- en quantités de calcaire à apporter se fait en utilisant l'équation :



Les valeurs obtenues sont traduites en unités de calcaire broyé à partir de sa teneur en CaO.

Le calcul tient compte d'une profondeur d'enfouissement de 10 cm (profondeur du travail superficiel du sol, Cf §2.3) et d'une densité apparente moyenne de 1,2. Les doses ainsi déterminées sont présentées dans le tableau 4.1-3.

Tableau 4.1-3 : Correspondance entre apports de OH^- et doses théoriques d'amendements.

OH^- (cmol(-) kg^{-1})	0,5	1,25	2,5	3,75	5,0	6,25	7,5	8,75	10,0
CaO (t ha^{-1})	0,16	0,42	0,84	1,26	1,68	2,10	2,52	2,94	3,36
Calc. broyé de Mad.(t ha^{-1})	0,32	0,8	1,61	2,41	3,22	4,03	4,83	5,60	6,45

En définitive, il faut en moyenne 6 à 8 cmol(-) par kilogramme de sol pour relever le pH_{KCl} de 4,0 à 6,5 dans les horizons concernés par le travail du sol (0-10 cm) de chacun des deux sols.

Les doses théoriques ainsi déterminées sont indexées à des valeurs de pH théoriques ou attendues et peuvent être confrontées avec les valeurs de pH obtenues sur le sol après application du calcaire broyé.

4.1.4. ESSAI PRELIMINAIRE : VALIDATION DES DOSES THEORIQUES DE CALCAIRE BROYE

Un essai préliminaire est mené, par incubation en conditions contrôlées, durant six semaines dans le double but de confronter le pH théorique au pH réel du sol pour une dose donnée et de tester le maintien ou non de l'effet du calcaire sur le pH.

4.1.4.1. Matériels et méthodes

Pour des raisons pratiques (économie d'échantillons, bonne corrélation entre les réponses des deux sols aux apports de OH^-), la validation des doses d'apport n'est réalisée que sur le sol de la Vallée du Niari (NC01).

Cinq doses croissantes de calcaire broyé (0 ; 2 ; 4 ; 5,6 et 6,45 t ha⁻¹) sont appliquées au sol et testées en trois répétitions sur le sol de la Vallée du Niari suivant le protocole présenté en détail au §4.3.

Les mesures sont réalisées une fois par semaine pendant les six semaines que dure l'incubation.

4.1.4.2. Résultats et discussion

Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.1-4.

Ces résultats suggèrent avant tout que, contrairement à ce qui a été noté au champ (§ 1.1), il y a une réponse beaucoup plus marquée du sol à l'apport de calcaire. Ce phénomène peut être assimilé au facteur de chaulage. Selon COPPENET *et al* (1986), la grande variabilité des valeurs de ce facteur de chaulage n'a pas encore été totalement expliquée, mais les principaux éléments qui le déterminent sont connus. Dans le cas présent on peut retenir :

- les caractéristiques de l'amendement utilisé : à quantité apportée identique, la fraction inférieure à 0,160 mm utilisée en laboratoire serait plus

réactive que le produit «tout venant» apporté en plein champ ;

- la qualité de l'incorporation de l'amendement : l'organisation des matériaux, l'humidité du sol et l'homogénéité du mélange obtenu ne sont pas comparables entre le laboratoire et le champ cultivé ;

- les caractéristiques physico-chimiques du sol : la saturation en calcium d'un agrégat terreux en contact avec une particule de calcaire, puis le transfert vers d'autres agrégats, bref la dissolution du calcaire et la diffusion de l'alcalinité dans le reste du sol sont soumis à des paramètres différents entre champ et laboratoire ;

- enfin, le facteur temps est important car la comparaison de valeur de pH obtenues après six semaines (laboratoire) et celles obtenues après six mois (terrain) est délicate.

Au laboratoire, les doses apportées présentent toutes un effet positif sur l'augmentation du pH. La dose de 2000 kg ha⁻¹ augmente le pH_{eau} d'une unité. Lorsqu'on double cette dose on obtient un surcroît de 0,8 unité et on atteint les valeurs de 6,7 (à l'eau) et 5,9 (au KCl M).

Les doses de 5,6 et 6,45 t ha⁻¹ permettent d'atteindre, voire dépasser pH_{eau} = 7, valeur peu recommandable au vu des risques de blocage des oligo-éléments et de baisse de la disponibilité des éléments majeurs (MENGEL et KIRKBY, 1982 ; BOYER, 1982 ; CALLOT *et al.*, 1982 ; CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

En dehors d'une légère baisse à la fin de la première semaine d'incubation, due vraisemblablement à une forte augmentation du CO₂ par l'activité microbienne pour les doses élevées, le pH demeure constant pendant les quatre premières semaines d'incubation avant de marquer un léger fléchissement à la sixième semaine. Il apparaît donc utile de **prolonger la durée de l'essai afin de mieux appréhender l'évolution du pH au cours du temps.**

On note également que pour les faibles doses (< 4 t ha⁻¹), les valeurs de pH_{KCl} obtenues sont supérieures aux valeurs attendues (tableau 4.1-4). Pour les fortes doses par contre (> 4 t ha⁻¹), quelque soit la durée d'incubation, le pH obtenu est inférieur au pH attendu. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que l'utilisation de l'équation (1) pour la traduction des équivalents OH⁻ en équivalents Ca²⁺ peut être discutée.

Tableau 4.1-4 : Récapitulatif des doses théoriques d'amendement, pH théorique et pH obtenus sur le sol du Niari au cours de l'essai préliminaire.

Apports de OH ⁻ (cmol(-) kg ⁻¹)		0	3,11	6,25	8,75	10,0
doses équivalentes (t calcaire ha ⁻¹)		0	2	4	5,6	6,45
pH attendu (*) (théorique)		3,8	4,8	6,5	7,3	7,6
pH obtenu (*) (réel)						
s	0	4,2 (4,9)	5,0 (5,9)	5,9 (6,7)	6,4 (7,2)	6,6 (7,3)
e	1	4,1 (5,0)	5,0 (5,9)	5,7 (6,4)	6,1 (6,6)	6,5 (6,8)
m	2	4,1 (5,0)	4,9 (5,9)	5,8 (6,8)	6,6 (7,4)	6,9 (7,6)
a	3	4,0 (5,1)	5,0 (6,0)	6,1 (7,1)	6,6 (7,4)	6,7 (7,6)
i	4	4,2 (4,9)	5,0 (5,6)	6,1 (6,8)	6,6 (7,2)	6,9 (7,7)
n	6	3,8 (4,9)	4,7 (5,6)	5,6 (6,3)	6,1 (6,8)	6,5 (7,4)

(*) Les pH sont entendus mesurés au KCl M, les valeurs entre parenthèses concernent le pH à l'eau.

En théorie, le calcaire incorporé au sol réagit avec différents composés selon trois équations élémentaires de dissolution (BOLT, 1967 ; VAN BREEMEN et al, 1983) pouvant se dérouler parallèlement :



En réalité, il y a une différence des produits finaux selon le pH final (CAMBIER, 1994, communication personnelle) :

- si le pH reste <5,5 , on a $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$: c'est bien le CO_2 qui se forme, et il n'y a pas d'ambiguïté dans l'utilisation de cette équation, donc $\text{CaO} \leq \leq 2 \text{OH}^-$.

- si, par contre, $6 < \text{pH} < 8,5$ c'est surtout le bicarbonate qui se forme (équation 3) et $\text{CaO} \rightleftharpoons \text{OH}^-$.

A la limite, aux $\text{pH} > 8,5$ l'ajout de CaCO_3 n'apporte pas de OH^- car ce dernier est stable, ce qui laisse d'ailleurs à penser que tout le calcaire apporté par les fortes doses n'aurait pas réagi en totalité.

Ces données permettent d'orienter les choix des doses faits dans les essais suivants (§ 4.3 et chapitre 5) en tenant compte des limites de pH à ne pas dépasser (Cf §1.1).

Les valeurs de pH optimales pour la plupart des cultures tropicales oscillant entre 4 et 7 (BOYER, 1978 et 1982), afin de rester dans des intervalles de pH raisonnable, éviter les risques de surchaulage et dans un souci de limitation du coût de l'amendement, les essais «longue durée» qui suivent ne comportent que *des doses ne dépassant pas 4000 kg ha⁻¹, soit des pH de l'ordre de 6 (dans KCl) ou 7 (dans l'eau)* comme l'indique le tableau 4.1-4.

En somme, les paragraphes précédents viennent de préciser la nécessité de remonter le pH par des apports de calcaire broyé et d'évaluer les doses requises à apporter sur la base des courbes potentiométriques, en relation avec le pouvoir tampon du sol.

La confrontation avec les résultats de l'incubation montre que cette méthode est intéressante si l'on veut rester dans des pH peu élevés, de l'ordre de 6. La méthode par incubation d'échantillons de sol avec des doses d'amendement quoique plus longue, a une portée plus générale pour établir une relation précise entre pH du sol et dose apportée. Elle permet également de préciser l'influence de l'amendement sur d'autres caractéristiques du sol, en particulier sur le complexe d'échange.

C'est ce que l'on verra plus loin avec les essais de longue durée réalisés sur les échantillons de surface des sols du Niari et de Mbé. Cependant l'apport et la présence de calcaire dans les sols peut entraîner des difficultés d'ordre méthodologique qu'il convient d'examiner auparavant.

4.2. RECHERCHE D'UNE METHODE DE DETERMINATION DES CATIONS ECHANGEABLES DANS UN SOL ACIDE APRES APPORT DE CALCAIRE

4.2.1. POSITION DU PROBLEME

Les ions adsorbés sur les colloïdes organo-minéraux du sol sont dits échangeables s'ils sont facilement déplacés par lavage avec une solution d'électrolyte (PEDRO, 1986 et 1987 ; OADES et *al*, 1989).

La méthode classique de mesure de la capacité d'échange à l'acétate d'ammonium à pH = 7 n'est pas adaptée à la mesure de la CEC effective des sols tropicaux à charges variables, car cette dernière est surestimée (SANCHEZ, 1976 ; FALLAVIER et *al*, 1985). Cette méthode est encore plus inadaptée à la détermination des cations échangeables lorsque ces sols subissent un apport d'amendement calcaire, car l'acétate dissout une partie des carbonates existant dans le sol, conduisant à une surestimation du calcium et/ou du magnésium échangeables.

Ces difficultés analytiques concernent en particulier certains des échantillons de sol devant être analysés dans la suite de l'étude ; cela a conduit à la comparaison de plusieurs méthodes parmi les plus courantes figurant dans la littérature.

L'objectif visé est de trouver une méthode facile à mettre en oeuvre, la plus rigoureuse et fiable possible, pour la détermination simultanée de la CEC et des cations échangeables dans ces sols acides ayant reçu des apports de calcaire broyé.

4.2.2. MATERIELS ET METHODES

4.2.2.1. Echantillons utilisés

L'étude porte d'abord sur la solubilisation, par plusieurs réactifs, du calcium et/ou du magnésium contenus dans le calcaire broyé de Madingou. Un réactif de laboratoire (CaCO_3 précipité pur, *LABOSI*) est utilisé afin de comparer sa solubilité avec celle du calcaire broyé de Madingou dans chacune des solutions utilisées.

Les différentes méthodes sont comparées sur l'horizon supérieur (0-10 cm) du sol sous culture dans la Vallée du Niari (NC01). Deux échantillons sont étudiés :

- sol seul,
- sol + équivalent de $6,45 \text{ t ha}^{-1}$ calcaire broyé de Madingou.

4.2.2.2. Solutions d'extraction

Six solutions de saturation et d'extraction sont comparées :

- (1) - solution molaire aqueuse d'acétate d'ammonium à pH 7,0 : méthode Metson (PELLOUX et *al*, 1971),
- (2) - NH_4Cl *M* à pH 8,5 en milieu éthanol à 60% (TUCKER, 1954),
- (3) - NH_4Cl *M* à pH 7,0 en milieu éthanol à 60% (méthode de TUCKER (1954) modifiée par PODWOJEWSKI et PETARD (1988),
- (4) - NH_4Cl *M* à pH 7,0 en milieu aqueux (PELLOUX et *al*, 1971),
- (5) - CH_3COONa *M* à pH 8,2 en milieu aqueux (PELLOUX et *al*, 1971),
- (6) - chlorure de cobaltihexamine à $20 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de sol (FALLAVIER et *al*, 1985),
- (7) - chlorure de cobaltihexamine à $50 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de sol (FALLAVIER et *al*, 1985),
- (8) - eau distillée (eau milli-Q).

4.2.2.3. Mode opératoire général

Il concerne les solutions (1) à (5) et (8).

La méthode retenue est inspirée de PELLOUX et *al* (1971), adaptée afin

de permettre des comparaisons avec la méthode à la cobaltihexammine de FALLAVIER et *al* (1985), notamment en fixant de façon invariable le rapport sol/solution à 1/20.

Une prise de 4 g de sol tamisé à 2 mm est introduite dans un tube à centrifuger préalablement taré et 80 mL de la solution à tester sont ajoutés.

L'agitation dure 2 heures, puis une centrifugation à 2000 g pendant 15 mn permet de recueillir le surnageant sur lequel les cations échangeables sont dosés en spectrométrie d'absorption atomique en flamme.

Le tube est pesé afin de déterminer par différence la quantité ν (en L) de solution piégée dans le culot et contenant νC mmol(cations), C étant la concentration de la solution du cation saturant.

Les cations saturants (NH_4^+ ou Na^+) fixés sont déplacés avec 2x50 mL de KCl M , recueillis dans des fioles jaugées de 100 mL dont le volume est ajusté au trait de jauge avec la solution de KCl M .

Le sodium est dosé en absorption atomique et le dosage de l'ammonium se fait par distillation d'une aliquote de 5 mL en présence de soude et titrage avec H_2SO_4 0,5 N .

Soit C' la concentration en mmol L^{-1} de NH_4^+ (ou Na^+) trouvée que l'on diminue de νC , la

$$\text{CEC} = 2,5(C' - 10\nu C) \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$$

Pour l'étude de la solubilisation du calcaire broyé ou de carbonate de calcium pur, la phase de déplacement par KCl M , qui sert à déterminer la CEC, n'est pas réalisée.

4.2.2.4. Méthode à la cobaltihexammine

C'est celle de REMY et ORSINI (1976) adaptée aux sols tropicaux par FALLAVIER et *al* (1985) qui mettent à profit l'affinité très marquée d'un ion complexe, le cation cobaltihexammine ($\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{+++}$) pour les sites d'échange du sol.

Dans un tube à centrifuger bouché de 100 mL préalablement taré, on pèse 4 g de sol sec tamisé à 2 mm. On ajoute 80 mL d'une solution de $\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_3$ à une concentration connue et telle que la quantité de $\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{+++}$ apportée soit équivalente à environ 2,5 fois la CEC présumée.

L'agitation dure 2 heures et la centrifugation permet de recueillir le surnageant sur lequel on dose tous les cations échangeables y compris Mn^{2+} et Al^{3+} ainsi que H^+ (par potentiométrie). Le dosage de Co^{3+} permet de calculer, en tenant compte de la quantité piégée dans le culot de centrifugation, la quantité de l'ion $Co(NH_3)_6^{+++}$ consommé, qui correspond à la CEC.

4.2.3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats concernent d'abord la solubilisation du calcaire broyé comparée à celle d'un carbonate pur de laboratoire dans les différents électrolytes.

Dans un deuxième temps, sont abordés la CEC puis les cations échangeables du sol avec et sans apport de calcaire broyé.

4.2.3.1. Solubilisation du calcium et du magnésium des carbonates

Il découle des résultats présentés dans le tableau 4.2-1, que la dissolution la plus faible est obtenue avec l'eau distillée. Les solutions aqueuses d'ammonium (1 et 4) dissolvent des quantités trop importantes de calcium, jusqu'à 30 à 60 fois celles dissoutes par l'eau distillée.

L'utilisation de solutions alcooliques (60% éthanol) d'ammonium (3) permet d'abaisser ce facteur de solubilisation à 9, puis à 2 lorsqu'en plus le pH est augmenté de 7 à 8,5 (solution 2).

La réduction de la solubilisation du calcium par l'adjonction d'alcool corrobore les résultats de TUCKER (1954) et ceux de PODWOLJEWSKI et PETARD (1988).

L'acétate de sodium à pH 8,2 solubilise également très peu de calcium moins de 7 fois le témoin «eau distillée».

De toutes les solutions tamponnées, seul le chlorure d'ammonium en solution alcoolique molaire à pH 8,5 serait à retenir, avec une solubilisation calcique intermédiaire entre l'eau distillée et les deux solutions de chlorure de cobaltihexammine.

L'examen des résultats concernant le magnésium fait ressortir que la solubilisation la plus faible est obtenue par l'acétate d'ammonium à pH 7, mais son facteur de solubilisation du calcium est le plus élevé de tous.

Tableau 4.2-1 : Solubilisation comparée du calcium et du magnésium par différentes solutions testées, sur le calcaire pur de laboratoire et le calcaire broyé de Madingou.

Solutions testées	carbonate pur <i>Labosi</i>		calcaire broyé de Madingou	
	Ca ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(Ca ²⁺ + Mg ²⁺)
	—————cmol(+) kg ⁻¹ —————			
(1) NH ₄ OAc <i>M</i> pH 7,0	30,00 *57,25	35,19 *58,17	0,08 *0,82	35,28 *50,03
(2) NH ₄ Cl <i>M</i> alc. pH 8,5	0,78 *1,02	1,28 *2,11	0,32 *3,19	1,60 *2,26
(3) NH ₄ Cl <i>M</i> alc. pH 7,0	4,98 *9,49	5,53 *9,14	0,47 *4,69	6,00 *8,51
(4) NH ₄ Cl <i>M</i> eau pH 7,0	20,71 *39,52	21,38 *35,34	0,72 *7,15	22,10 *31,34
(5) NaOAc pH 8,2	2,77 *5,27	4,22 *6,97	0,43 *4,34	4,65 *6,59
(6) cobaltihex. 20	1,36 *2,60	2,58 *4,27	0,34 *3,41	2,92 *4,15
(7) cobaltihex. 50	1,27 *2,41	2,45 *4,05	0,38 *3,75	2,82 *4,00
(8) eau distil.	0,52 *1	0,61 *1	0,10 *1	0,71 *1

Les valeurs précédées d'un astérisque indiquent le rapport de la valeur correspondante à la quantité extraite par l'eau distillée (facteur de solubilisation).

L'ordre d'agressivité croissant est le suivant :

(8) < (2) < (7) < (6) < (5) < (3) < (4) < (1) pour le calcium,

(1) < (8) < (2) < (5) < (6) < (7) < (3) < (4) pour le magnésium.

En considération des facteurs de solubilisation du magnésium et du calcium du calcaire broyé (tableau 2.4-1), les électrolytes les moins agressifs sont : (2) NH₄Cl *M* en solution alcoolique à pH 8,5 suivi du chlorure de cobaltihexammine à 50 et 20 cmol(+) kg⁻¹ (solutions 7 et 6).

Il convient, avant d'analyser les effets de ces électrolytes sur les cations échangeables, d'aborder leurs effets sur la CEC afin d'intégrer le taux de saturation

du complexe dans la discussion des résultats.

4.2.3.2. Capacité d'échange cationique du sol

D'une façon générale, la CEC du sol augmente avec l'apport de calcaire broyé, comme le montre le tableau 4.2-2, ce qui est en accord avec tout ce qui précède (Cf §3.2).

Tableau 4.2-2 : Capacités d'échange cationique mesurées par différents électrolytes et comparées avec et sans apport de calcaire broyé.

solutions	CEC (cmol(+) kg ⁻¹)	
	sol seul (NC01)	sol + calcaire
(1) NH ₄ OAc <i>M</i> pH 7,0	6,19	9,66
(2) NH ₄ Cl <i>M</i> alc. pH 8,5	21,21	25,31
(3) NH ₄ Cl <i>M</i> alc. pH 7,0	18,62	20,96
(4) NH ₄ Cl <i>M</i> eau pH 7,0	7,62	6,88
(5) NaOAc pH 8,2	8,82	13,00
(6)cobaltihex. 20	4,01	6,62
(7) cobaltihex. 50	4,24	7,26

Lors de l'équilibrage sol-solution, pour la mesure de la CEC, les surnageants des solutions d'acétate de sodium à pH 8,2 apparaissent très colorés. Cette coloration jaune, plus marquée pour les solutions de NH₄Cl *M* dans l'alcool à pH 8,5, traduit une dispersion des colloïdes minéraux du sol aux pH élevés.

Cette observation corrobore celle faite au §3.2 où la mise en équilibre du sol avec des solutions d'électrolytes se traduit, aux valeurs de pH extrêmes, par une peptisation des argiles. L'analyse par diffractométrie des rayons X révèle qu'il s'agit de la kaolinite désordonnée et de la goethite alumineuse de la fraction argileuse de ces sols, qui sont ainsi mis en suspension.

La défloculation des minéraux de la phase solide ainsi observée rend aléatoire l'évaluation de la capacité d'échange aux pH élevés (WILCZYNSKY *et al.*, 1992). Les solutions à pH élevé sont donc à éviter. La préparation à l'alcool

surestime considérablement (2 à 3 fois) la CEC mesurée par NH_4Cl M à pH 7.

En définitive ce sont les deux solutions de cobaltihexammine (6 et 7), l'acétate d'ammonium à pH 7 (1) et le chlorure d'ammonium en solution aqueuse molaire neutre (4) qui semblent les mieux appropriées.

Il apparaît judicieux d'affiner cette analyse par la prise en compte des taux de saturation du complexe.

4.2.3.3. Cations échangeables

Le tableau 4.2-3 présente les teneurs en cations échangeables extraits par les différents électrolytes utilisés.

Tableau 4.2-3 : Cations échangeables déterminés par les différents électrolytes.

solutions	Cations échangeables (cmol(+) kg ⁻¹)								
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SOM1	Mn ²⁺	Al ³⁺	SOM2	TSB
(1) NH_4OAc M pH 7,0	2,92	0,35	0,18	0,06	3,51	-	-	-	57
	14,01	0,48	0,18	0,06	14,72	-	-	-	152
(2) NH_4Cl alc. pH 8,5	1,05	0,08	0,23	0,06	1,43	-	-	-	7
	1,31	0,08	0,26	0,13	1,78	-	-	-	7
(3) NH_4Cl alc. pH 7	2,38	0,31	0,22	0,04	2,97	-	-	-	16
	6,80	0,33	0,23	0,07	7,43	-	-	-	35
(4) NH_4Cl eau pH 7	3,59	0,33	0,24	0,07	4,22	-	-	-	55
	12,91	0,44	0,23	0,09	13,68	-	-	-	199
(5) NaOAc pH 8,2	3,22	0,30	0,18	-	3,70	-	-	-	42
	10,67	0,36	0,20	-	11,24	-	-	-	87
(6) cobalti. 20	3,11	0,35	0,10	0,08	3,70	0,40	0,01	4,23	92
	5,95	0,41	0,12	0,11	6,59	0,11	0,01	6,75	102
(7) cobalti. 50	2,85	0,40	0,15	0,06	3,44	0,60	0,13	4,16	81
	7,29	0,35	0,12	0,06	7,80	0,11	0,05	7,97	110
(8) eau distil	0,17	0,07	0,13	0,04	0,39	0,10	0,13	0,62	-
	2,23	0,02	0,11	0,10	2,47	0,05	0,06	2,58	-

Les valeurs en gras sont celles obtenues sur l'échantillon ayant reçu le calcaire broyé, SOM1 est la somme des cations «basiques» et SOM2 la somme de tous les cations, y compris les cations «acides». TSB (en %) est le taux de saturation du complexe en cations basiques. Le tiret indique que la mesure est impossible.

Les solutions alcooliques de chlorure d'ammonium (2 et 3), malgré leur solubilisation raisonnable du calcium et du magnésium de l'amendement, entraînent des taux de saturation du complexe en bases peu conformes à la réalité, du fait d'une surestimation de la CEC.

L'utilisation de l'acétate de sodium n'autorise pas le dosage du sodium, ce qui est peu important en considération de ses teneurs faibles et quasi-constantes dans ces sols. Par ailleurs, l'inconvénient de son pH trop élevé a été abordé plus haut.

Les solutions molaires aqueuses d'acétate et de chlorure d'ammonium à pH 7 (1 et 4) sont presque équivalentes pour le sol et présente le même taux de saturation en cations basiques. La solubilisation de calcium augmente considérablement la valeur de ces taux de saturation.

Les solutions d'acétates sont cependant à proscrire, d'autant plus que PELLOUX *et al* (1971) estiment que l'ion CH_3COO^- serait fortement retenu dans les sols riches en sesquioxides et en kaolinite. Il vaudrait donc mieux effectuer la saturation en NH_4^+ au moyen de solutions de chlorure.

Les solutions de chlorure de cobaltihexammine, en minimisant la solubilisation du calcium et du magnésium de l'amendement, conduisent à des taux de saturation en cations «basiques» raisonnables. La prise en compte des cations «acides» qu'on peut doser dans l'extrait, permet d'aboutir à une somme des cations presque égale à la CEC.

Cet aspect est discuté ci-après pour un choix judicieux de la méthode à préconiser pour la détermination de la CEC et des cations échangeables d'un sol acide avant et après apport de calcaire broyé.

4.2.4. JUSTIFICATION DU CHOIX DE LA METHODE

Les cations minéraux présents dans un sol proviennent de l'altération lente plus ou moins poussée des minéraux primaires (PEDRO, 1979b). Lorsqu'ils ne sont pas incorporés dans les minéraux néoformés, ils sont sous forme libre, tout comme ceux provenant de la minéralisation de la matière organique. Ces cations

sont sous forme soluble, échangeable ou rétrogradée.

La forme soluble des cations est souvent confondue avec la forme échangeable car les échanges sont rapides entre ces deux formes et l'analyse ne les sépare pas distinctement (FALLAVIER et OLIVIN, 1988).

Les cations échangeables représentent la fraction des cations disponibles à un instant donné, retenus par attraction électrostatique à la surface des colloïdes minéraux et organiques du sol en équilibre avec les charges négatives.

Une bonne méthode de détermination des cations échangeables doit donc pouvoir rendre compte de la situation réelle du complexe d'échange à un instant donné. De plus, ces sols, comme cela a été montré au §3.2, présentent des charges variables en fonction du pH, et de la concentration de la solution du sol.

En définitive, il reste que le chlorure de cobaltihexammine paraît la solution la plus appropriée car, non seulement elle minimise la solubilisation du calcium de l'amendement, mais elle permet également de mesurer la CEC au pH du sol.

Cette méthode, proposée par REMY et ORSINI (1976) et adaptée aux sols tropicaux par FALLAVIER et *al* (1985), présente également l'avantage de mesurer simultanément la CEC et les cations échangeables. Elle paraît aussi appropriée pour les sols acides ayant reçu un amendement calcaire.

Le chlorure de cobaltihexammine extrait cependant très peu le potassium par rapport aux autres solutions. Ce phénomène, également rapporté par FALLAVIER et *al* (1985), est attribué à la taille de l'ion cobaltihexammine (7 Å contre par exemple 1,48 Å pour NH_4^+).

L'accent est ainsi mis sur une **méthode simple, utilisable en routine et donnant une image du complexe d'échange et de sa garniture** telle qu'elle est modifiée par le mode de gestion du sol. C'est cette méthode qui est utilisée pour le suivi des modifications du complexe d'échange par les apports de calcaire, qui va à présent être abordé.

4.3. EFFETS DE DOSES CROISSANTES DE CALCAIRE BROYÉ ET/OU DU *Pueraria javanica* SUR LE COMPLEXE D'ÉCHANGE

La dissolution du calcaire apparaît comme une réaction de surface (HARTWIG et LOEPPERT, 1992) et peut être schématisée par la figure 4.3-1 (pour des raisons didactiques, on considère la calcite pure).

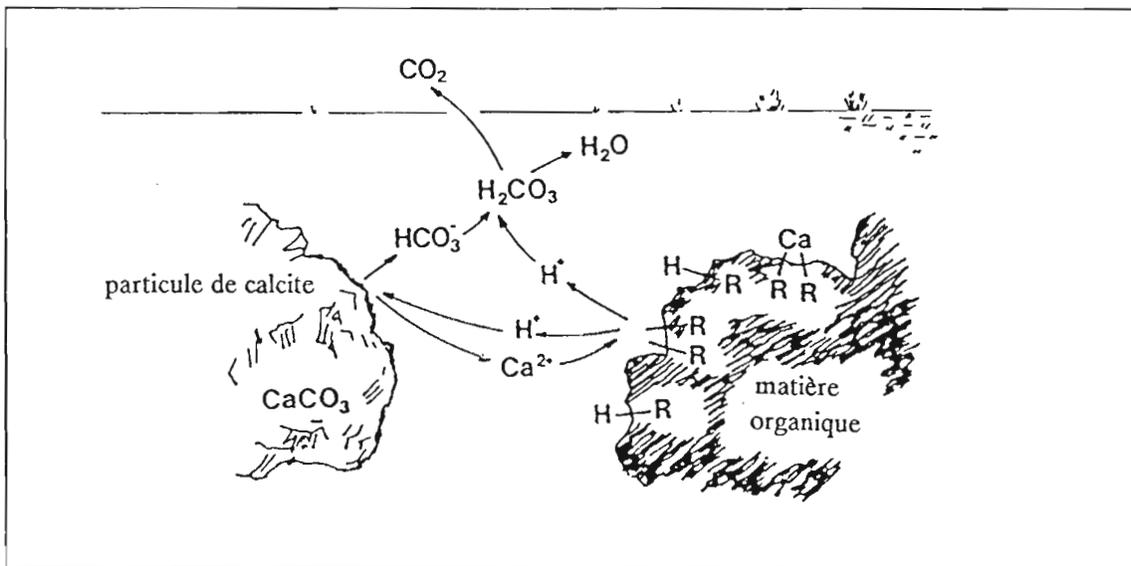


Figure 4.3-1 : Interactions entre les particules de calcaire, le complexe d'échange et la solution du sol (d'après WARFVINGE et SVERDRUP, 1989).

Le calcium libéré par la dissolution du calcaire participe aux réactions d'échange dans le sol. En sol acide, une réaction importante concerne H^+ (WARFVINGE et SVERDRUP, 1989) et peut être écrite :



où R-H et R-Ca_{1/2} représentent H^+ et Ca^{2+} échangeables.

L'ensemble des processus impliqués induit des modifications

concernant aussi bien la lixiviation ou l'accumulation des composés formés, les échanges d'ions que la minéralisation de l'azote organique (COPPENET *et al*, 1986 ; SUMNER *et al*, 1991).

C'est donc dans le but de mieux comprendre le comportement des sols étudiés en présence de différentes doses de calcaire broyé qu'une expérience par incubation est menée en laboratoire.

Il est alors nécessaire de caractériser les produits utilisés dans la correction de l'acidité des sols de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

4.3.1. CARACTERISATION DES PRODUITS UTILISES

4.3.1.1. Calcaire broyé de Madingou

Le calcaire broyé de Madingou est issu de l'étage inférieur du schisto-calcaire du Niari (SCI), composé de calcaire cristallin gris à rose (DADET, 1969). L'analyse minéralogique effectuée par diffractométrie des rayons X sur poudre révèle la présence de calcite importante, de dolomite et de quartz.

La roche est concassée puis broyée dans l'Usine de Broyage de Calcaire (UCB) située à quelques kilomètres de Madingou, dans la Vallée du Niari. Sa capacité de production est de 20 000 tonnes par an.

Les produits utilisés dans la correction de l'acidité varient par leur capacité de neutralisation en fonction de leur minéralogie, leur morphologie, leur granulométrie et leur réactivité chimique (BARBER, 1984 ; HARTWIG et LOEPPERT, 1992).

Les amendements calcaires sont divisés en cinq classes dans la norme française AFNOR NFU 44001 (CELAC, 1990) :

- classe I : Amendements calcaires ; produits crus.
- classe II : Amendements calcaires magnésiens et amendements magnésiens ; produits crus également.
- classe III : chaux vives ; produits cuits.
- classe IV : Amendements mixtes, mélanges de produits crus et cuits.
- classe V : résidus de sucrerie et boues de décalcification.

Le calcaire broyé de Madingou est de classe II.

La finesse est appréciée par la quantité de produit passant à travers les mailles de tamis d'ouverture donnée (BOYER, 1978), comme le montre le tableau 4.3-1.

Tableau 4.3-1 : Finesse des calcaires et dolomies broyés selon les normes NFU 440 (BOYER, 1978).

Type de calcaire	ouverture des mailles (mm)
A	0,080
B	0,160
C	0,315
D	1,00
E	5,00
F	>

Traversant d'emblée le tamis de 5 mm, le calcaire broyé de Madingou est passé sur une tamiseuse vibrante munie d'une série de trois tamis à mailles respectives de 1, 0,315 et 0,160 mm.

Sur des prises d'essai de 250 g, répétées quatre fois, les résultats obtenus montrent que 90% de ce calcaire broyé passent au travers du tamis à mailles de 1 mm, ce qui fait qu'il est de type D. Le calcaire broyé de Mantsoumba serait donc ainsi, selon la classification donnée par BOYER (1978), à la limite des produits à action rapide.

Pour les essais d'incubation au laboratoire, seule est retenue la *fraction inférieure* à 0,160 mm par souci d'homogénéité du produit et de rapidité d'action des particules fines. Celle-ci représente plus de 60% du produit tout venant.

La composition chimique, déterminée sur trois fractions granulométriques au Laboratoire d'analyses du BRGM à Orléans, est donnée dans le tableau 4.3-2.

Une analyse par volumétrie à l'acide chlorhydrique (calcimètre Bernard) est réalisée au Laboratoire de Comportement des Sols Cultivés du Centre ORSTOM de Montpellier. Celle-ci révèle, en faisant l'hypothèse de la présence de carbonate de calcium uniquement, un taux de 94,23% de CaCO_3 , soit 52,76% de CaO, résultat qui concorde avec le précédent.

Tableau 4.3-2 : Composition chimique du calcaire broyé de Madingou (en g kg⁻¹).

Taille (mm)	CaO	MgO	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
1-0,315	51,80	2,00	0,06	3,00	0,40	0,30
0,315-0,160	51,80	2,05	0,07	3,80	0,60	0,40
<0,160	51,50	2,05	0,12	4,25	1,00	0,68

La valeur neutralisante est définie, selon la norme NFU 44001, comme la quantité d'oxyde de calcium ayant la même capacité de neutralisation que 100 kg du produit considéré (CELAC, 1990). Le magnésium est capable, au même titre que le calcium, de neutraliser l'acidité, mais la magnésie a une plus grande capacité de neutralisation que l'oxyde de calcium à poids égal (1 g de MgO équivaut à 1,4 g de CaO). La valeur neutralisante du calcaire broyé de Madingou est donc de $51,5 + (2,5 \times 1,4) = 55$, valeur courante pour les produits de ce type selon COPPENET et al (1986).

4.3.1.2. Matière végétale enfouie

Lors de la mise en culture, le *Pueraria javanica* qui est utilisé dans la jachère cultivée est rabattu ou girobroyé avant d'être enfoui. Il est donc intéressant d'en apprécier le rôle sur les propriétés physico-chimiques par des incubations au laboratoire.

Les échantillons ont été prélevés dans la parcelle n° 24 du CAIEM, à une centaine de mètres de l'essai «Chaulage 89/91» sur une large bande non défrichée portant une végétation de deux ans, donc du même âge que celle qui est habituellement enfouie lors de la remise en culture d'une parcelle.

La détermination de la biomasse végétale a été faite sur des placeaux de 2 m x 2 m : le *Pueraria* est coupé à la machette et immédiatement pesé sur une balance de terrain puis une prise est effectuée dans une boîte tarée fermée qui est par la suite rapportée au laboratoire où, après passage à 105°C pendant 24 heures, le taux d'humidité est déterminé. Pour quatre placeaux de 4 m² chacun, les valeurs moyennes obtenues sont de 86,5 % pour le taux d'humidité et pour la biomasse produite (en matière sèche) : 4773,3 kg ha⁻¹ soit 4,8 t ha⁻¹.

Sa composition chimique totale déterminée après calcination et reprise

à l'acide chlorhydrique est donnée dans le tableau 4.3-3.

Tableau 4.3-3 : Composition chimique totale du *Pueraria javanica* (en g kg⁻¹ de matière sèche).

Eléments	Ca	Mg	K	Na	Al	Mn
			g kg ⁻¹ MS			
Composition	69,50	3,01	13,64	0,15	0,16	0,66

C'est cette composition chimique des intrants utilisés dans les essais, qui permet d'établir les bilans des éléments apportés dans les différentes expérimentations présentées par la suite.

Il convient alors d'examiner les problèmes inhérents à la correction de l'acidité par les apports de calcaire.

En se calant sur les saisons, il y a une possibilité d'apport du calcaire de la fin-juin à la mi-octobre dans le Sud-Congo, soit à peu près une période de 4 mois. L'approche expérimentale adoptée ici permet d'apprécier les effets de trois facteurs : **doses de calcaire**, présence ou non de **matière végétale** et **durée de contact** sur quelques paramètres physico-chimiques choisis du sol.

4.3.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'incubation porte sur les échantillons de sol provenant des horizons supérieurs du sol de la Vallée du Niari (NC01) et de Mbé-Batéké (BS1).

4.3.2.1. Procédure utilisée

L'incubation se fait dans des tubes en PVC de 4,5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur muni d'un fond grillagé en toile de polypropylène à mailles de

0,1 mm permettant les échanges gazeux. Le fond du tube est garni de coton de verre surmonté par une rondelle de la même toile que le fond grillagé. Un autre tampon de coton de verre de 5 mm d'épaisseur est placé au-dessus de l'échantillon de sol afin de réduire les perturbations lors des apports d'eau.

Le sol est humecté à l'eau pure (milli-Q) et maintenu à une humidité équivalant à pF 2,5 qui correspond à l'humidité du sol au champ la plus grande partie de l'année. L'humidité est ramenée tous les deux jours à cette valeur pour compenser les pertes par évaporation déterminées par pesée. Il n'y a pas de drainage et donc pas de lixiviation des éléments minéraux hors des tubes.

L'incubation a lieu dans une étuve biologique où la température est maintenue à 25 ± 2 °C.

Trois doses de calcaire broyé (0, 2000 et 4000 kg ha⁻¹) sont retenues à l'issue de §4.2, de façon à ne pas dépasser p_H_{eau} 7 (ou p_H_{KCl} 6). Elles sont combinées ou non avec une dose unique de matière végétale ; cette incorporation de la matière végétale est faite sous forme de feuilles de *Pueraria javanica* broyées et tamisées entre 2 et 0,2 mm à la quantité équivalente à celle enfouie dans le sol par le labour, soit 4,8 t MS ha⁻¹, comme indiqué ci-avant (Cf 4.3.1.2.).

Six traitements sont ainsi obtenus :

- 0 : sol témoin,
- MV = enfouissement d'un équivalent de 4800 kg ha⁻¹ de matière végétale,
- 2t = apport d'un équivalent de 2000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé,
- 2tMV = 2000 kg ha⁻¹ de calcaire + 4800 kg ha⁻¹ de matière végétale,
- 4t = apport d'un équivalent de 4000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé,
- 4tMV = 4000 kg ha⁻¹ de calcaire + 4800 kg ha⁻¹ de matière végétale.

Ces six traitements sont appliqués sur des prises d'essai de $80 \pm 0,01$ g de sol.

Trois répétitions sont conduites et les mesures sont faites à 0, 3, 8 et 12 semaines.

Pour les traitements mis en oeuvre, chacune des répétitions effectuées est préparée individuellement par pesée et mélange, puis transférée dans un tube d'incubation.

La semaine 0 correspond à un temps de contact de deux heures après humectation, suivi des mêmes opérations que dans les autres cas.

A la fin de chaque durée de contact, les tubes correspondants sont

«sacrifiés» afin de procéder aux différentes mesures retenues.

4.3.2.2. Paramètres étudiés et méthodes d'analyse

A chaque échéance, les échantillons de sol sont mis à sécher à 60 °C pendant 24 heures dans une étuve ventilée, passés au tamis de 2 mm et conservés dans des sachets en polyéthylène étanches.

Les déterminations portent sur les carbonates totaux résiduels, le carbone organique ainsi que sur des caractéristiques mesurées sur l'acidité du sol et le complexe d'échange.

Les carbonates résiduels du sol après réaction avec le sol sont mesurés par deux méthodes : dosage volumétrique du dégagement du CO₂ au calcimètre Bernard d'une part, et attaque chlorhydrique avec titrage en retour par la soude, d'autre part.

La présence de manganèse dans le sol du Niari interdisant l'utilisation de la méthode Anne (mesure basée sur les degrés d'oxydo-réduction du chrome), le carbone organique est dosé par voie sèche au CHN LECO, après attaque avec HCl (destruction des éventuels carbonates résiduels).

Le pH du sol est mesuré sur une suspension de sol dans l'eau (pH_{eau}) et dans une solution de KCl M (pH_{KCl}) avec un pH-mètre *Tacussel* muni d'une électrode de verre. La prise de sol est de 10 g et le rapport sol/solution de 1/2,5.

La capacité d'échange cationique et les cations échangeables sont déterminés par la méthode au chlorure de cobaltihexammine, comme précédemment indiqué (Cf §4.2).

4.3.3. RESULTATS

4.3.3.1. Carbonates résiduels et carbone organique

Le dosage des carbonates résiduels par les méthodes courantes (calcimètre Bernard ou attaque chlorhydrique avec titrage en retour par la soude) a été impossible au vu de la faiblesse des quantités de carbonates incorporées dans le sol (< 0,5%).

Les teneurs en carbone organique, de l'ordre de 16 à 18 g kg⁻¹, ne sont pas influencés de façon significative par les apports de calcaire ou de matière

végétale. Il n' a pas non plus de variations significatives des teneurs en matière organique du sol pendant les douze semaines que dure l'incubation.

Cette absence de variations significatives fait que les modifications du complexe d'échange sont *bien attribuables aux effets des doses de calcaire broyé et/ou de l'enfouissement de matière végétale*.

4.3.3.2. Effets du calcaire et du *Pueraria* sur la réaction du sol

Les apports de calcaire ont un effet immédiat sur le pH ; l'action du calcaire sur l'augmentation du pH se manifeste aussi bien pour le sol du Niari que pour celui de Mbé-Batéké. Cette rapidité d'action du calcaire broyé, après seulement deux heures de contact à humidité équivalente à pF 2,5 est sûrement due à sa finesse qui en fait un produit très soluble (Cf §4.2).

4.3.3.2.1. pH_{eau}

En début d'incubation,

- pour le **sol du Niari**, un apport de 2000 kg ha⁻¹ relève le pH de près d'une unité et 4000 kg ha⁻¹ de 1,5 unité ;

- pour le **sol de Mbé**, l'effet, moins marqué avec 2000 kg ha⁻¹ (0,6 unité pH), est spectaculaire avec 4000 kg ha⁻¹ (2,2 unités pH).

L'apport de matière végétale n'a aucun effet sur le pH_{eau} et n'influence pas non plus l'action du calcaire (tableaux 4.3-1 et 4.3-2).

Au bout de 3 semaines d'incubation, les effets restent bien marqués : outre l'augmentation du pH par les apports de calcaire, on note une légère amélioration due à l'apport de *Pueraria* surtout avec la dose de 2000 kg ha⁻¹.

Cette interaction du calcaire avec la matière végétale s'estompe à partir de la 8^e semaine d'incubation pour le sol du Niari, mais elle se prolonge pour le sol de Mbé.

La baisse progressive du pH_{eau} *confirme les résultats de l'essai préliminaire* (Cf §4.2) *dans lequel le fléchissement du pH débute à la sixième semaine*. Elle peut s'expliquer par l'accumulation dans le sol, de CO₂, de NO₃⁻ et de divers acides organiques produits par l'activité microbienne.

Cette baisse a également été notée pour les sols de la Vallée du Niari dans des incubations en pots conduits à la température ambiante (MBOM, 1991 ; NDANDOU, 1992).

Tableau 4.3-1 : Effets des différents traitements sur le pH_{eau} du sol du Niari au cours de l'incubation.

Traitements	durée d'incubation (semaines)			
	0	3	8	12
0	4,67 ^a 0,06	4,58 ^a 0,01	4,51 ^a 0,04	4,13 ^a 0,00
MV	4,72 ^a 0,05	4,74 ^b 0,01	4,69 ^b 0,04	4,13 ^a 0,02
2t	5,57 ^b 0,07	5,37 ^c 0,01	5,17 ^c 0,02	4,89 ^b 0,02
2tMV	5,50 ^b 0,04	5,57 ^d 0,07	5,12 ^c 0,03	4,90 ^b 0,04
4t	6,17 ^c 0,04	6,27 ^e 0,01	5,93 ^d 0,01	5,74 ^c 0,02
4tMV	6,23 ^c 0,02	6,26 ^e 0,02	5,95 ^d 0,09	5,71 ^c 0,09

Pour chaque colonne, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes à 95% selon le test de Newman-Keuls.

Tableau 4.3-2 : Effets des différents traitements sur le pH_{eau} du sol de Mbé au cours de l'incubation.

Traitements	durée d'incubation (semaines)			
	0	3	8	12
0	4,59 ^a 0,17	4,42 ^a 0,08	4,87 ^a 0,02	4,38 ^a 0,03
MV	4,50 ^a 0,02	4,71 ^b 0,05	4,80 ^a 0,05	4,44 ^b 0,04
2t	5,24 ^b 0,03	5,04 ^c 0,04	5,73 ^b 0,02	5,52 ^d 0,04
2tMV	5,24 ^b 0,03	5,22 ^d 0,08	5,85 ^c 0,11	5,42 ^c 0,02
4t	6,78 ^c 0,01	6,60 ^e 0,04	6,51 ^d 0,04	6,19 ^e 0,00
4tMV	6,58 ^c 0,31	6,71 ^f 0,05	6,46 ^d 0,05	6,24 ^e 0,04

Pour chaque colonne, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes à 95% selon le test de Newman-Keuls.

Tableau 4.3-3 : Effets des différents traitements sur le pH_{KCl} du sol du Niari au cours de l'incubation.

Traitements	durée d'incubation (semaines)			
	0	3	8	12
0	3,87 _{0,02} a	4,02 _{0,02} a	3,86 _{0,01} a	3,71 _{0,02} a
MV	3,96 _{0,03} b	4,06 _{0,06} a	3,99 _{0,02} b	3,76 _{0,01} a
2t	4,73 _{0,02} c	4,80 _{0,04} b	4,49 _{0,05} c	4,43 _{0,03} b
2tMV	4,74 _{0,04} c	4,94 _{0,03} c	4,52 _{0,03} c	4,42 _{0,04} b
4t	5,56 _{0,07} d	5,78 _{0,03} d	5,30 _{0,06} d	5,35 _{0,01} c
4tMV	5,53 _{0,03} c	5,77 _{0,02} d	5,25 _{0,01} d	5,31 _{0,10} c

Pour chaque colonne, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes à 95% selon le test de Newman-Keuls.

Tableau 4.3-4 : Effets des différents traitements sur le pH_{KCl} du sol de Mbé au cours de l'incubation.

Traitements	durée d'incubation (semaines)			
	0	3	8	12
0	4,07 _{0,02} a	4,14 _{0,02} a	4,10 _{0,05} a	3,97 _{0,02} a
MV	4,15 _{0,03} b	4,28 _{0,10} b	4,12 _{0,05} a	4,02 _{0,04} a
2t	5,08 _{0,03} c	4,14 _{0,01} a	4,87 _{0,06} b	4,88 _{0,05} b
2tMV	5,07 _{0,04} c	4,22 _{0,04} ab	4,03 _{0,02} a	4,90 _{0,04} b
4t	5,91 _{0,08} e	5,99 _{0,04} c	5,86 _{0,03} d	5,76 _{0,02} c
4tMV	5,80 _{0,04} d	5,97 _{0,07} c	5,75 _{0,03} c	5,68 _{0,11} c

Pour chaque colonne, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes à 95% selon le test de Newman-Keuls.

Tableau 4.3-5 : Effets des différents traitements sur l'évolution du deltapH du sol du Niari au cours de l'incubation.

Traitements	durée d'incubation (semaines)			
	0	3	8	12
0	-0,80 _a 0,07	-0,56 _{ab} 0,02	-0,65 _a 0,03	-0,42 _b 0,02
MV	-0,76 _a 0,08	-0,68 _a 0,07	-0,70 _a 0,05	-0,37 _b 0,01
2t	-0,84 _a 0,07	-0,57 _{ab} 0,03	-0,68 _a 0,04	-0,47 _a 0,03
2tMV	-0,76 _a 0,00	-0,63 _a 0,10	-0,60 _a 0,01	-0,47 _a 0,03
4t	-0,60 _b 0,05	-0,48 _b 0,04	-0,63 _a 0,06	-0,39 _b 0,03
4tMV	-0,71 _a 0,02	-0,49 _b 0,01	-0,69 _a 0,10	-0,39 _b 0,02

Tableau 4.3-6 : Effets des différents traitements sur l'évolution du deltapH du sol de Mbé au cours de l'incubation.

Traitements	durée d'incubation (semaines)			
	0	3	8	12
0	-0,51 _b 0,17	-0,28 _e 0,08	-0,77 _{bc} 0,06	-0,41 _c 0,02
MV	-0,35 _{bc} 0,01	-0,43 _d 0,15	-0,68 _c 0,04	-0,42 _c 0,01
2t	-0,16 _c 0,04	-0,91 _a 0,05	-0,87 _b 0,05	-0,63 _a 0,05
2tMV	-0,17 _c 0,06	-1,00 _a 0,05	-1,82 _a 0,10	-0,51 _{bc} 0,05
4t	-0,87 _a 0,09	-0,61 _c 0,02	-0,65 _c 0,05	-0,43 _c 0,02
4tMV	-0,78 _a 0,28	-0,74 _b 0,04	-0,71 _c 0,02	-0,56 _{ab} 0,11

Pour chaque colonne, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes à 95% selon le test de Newman-Keuls.

4.3.3.2.2. pH_{KCl}

Les variations du pH_{KCl} suivent grosso modo celles du pH_{eau} .

Dans le sol du Niari, l'apport de calcaire augmente significativement le pH_{KCl} ; la matière végétale apportée seule n'augmente significativement le pH_{KCl} qu'en début d'incubation et après 8 semaines ; l'interaction du calcaire avec la matière végétale, absente pour la dose de 2000 kg ha⁻¹ en début d'incubation, s'inverse après 3 semaines avant de s'estomper jusqu'à la fin de l'incubation (tableau 4.3-3).

Dans le sol de Mbé-Batéké, par contre, l'effet du *Pueraria* sur l'augmentation du pH_{KCl} significative au début ne l'est plus à partir de la 8^e semaine (tableau 4.3-4). L'interaction du calcaire avec la matière végétale est nulle et la combinaison calcaire-*Pueraria* a plutôt tendance à abaisser le pH_{KCl} .

4.3.3.2.3. ΔpH

Les ΔpH (tableaux 4.3-5 et 4.3-6) sont **tous négatifs**, ce qui signifie que l'on se trouve dans les *gammes de pH où la capacité d'échange, bien que faible, est de manière prépondérante cationique* (SANCHEZ, 1976 ; UEHARA et GILLMAN, 1980).

Dans le sol de la Vallée du Niari, peu de différences existent entre les traitements pour un temps d'incubation donné ; on note néanmoins une baisse des valeurs en fin d'incubation, surtout marquée pour la dose de 4000 kg ha⁻¹.

Dans le sol du plateau de Mbé-Batéké, l'apport de 4000 kg ha⁻¹ de calcaire avec ou sans *Pueraria* augmente le ΔpH tandis que celui de 2000 kg ha⁻¹ l'abaisse significativement en début d'incubation. Ce ΔpH atteint des valeurs extrêmement élevées aux troisième et huitième semaines par abaissement du pH_{KCl} par la combinaison de 2000 kg ha⁻¹ de calcaire avec la matière végétale.

4.3.3.3. Effets sur le complexe d'échange

Il est apparu, à l'issue du chapitre 2, qu'aux valeurs de pH courantes, le complexe d'échange des sols considérés reste chargé négativement. Les modifications dues à l'apport de calcaire et de matière végétale sont donc étudiés sur la CEC et les cations échangeables, déterminés par la méthode à la cobaltihexammine.

4.3.3.3.1. Capacité d'échange cationique

La figure 4.3-2 montre l'évolution de la CEC au cours de l'incubation. Dans tous les cas, comme cela a été révélé au chapitre 1, les CEC du sol du plateau de Mbé restent de loin inférieures à celles du sol de la Vallée du Niari.

Dans le sol du Niari, la CEC est de l'ordre de 4 cmol(+) kg⁻¹ pour le témoin en début d'incubation. Celle-ci est augmentée à des valeurs atteignant 5,5 et 8,4 par les apports des équivalents respectifs de 2000 et 4000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé. L'incorporation de matière végétale au sol n'augmente sensiblement la CEC que lorsqu'elle est combinée à la dose de 4000 kg ha⁻¹. Cet effet du *Pueraria* s'estompe à partir de la troisième semaine et les valeurs de CEC ainsi obtenues restent quasi-constantes jusqu'à la fin de l'incubation.

Dans le sol du plateau de Mbé-Batéké, la CEC passe de 1 cmol(+) kg⁻¹ à 2,2 et 3,6 cmol(+) kg⁻¹ pour les apports respectifs de 2000 et 4000 kg ha⁻¹ dès le début de l'essai. A la troisième semaine, alors que l'on note une stabilisation autour de 2,8 cmol(+) kg⁻¹ pour la dose de 2000 kg ha⁻¹, il y a une montée à des valeurs de 4,5 cmol(+) kg⁻¹ pour l'apport de 4000 kg ha⁻¹. La CEC se maintient à ces valeurs jusqu'à la huitième semaine d'incubation.

L'effet de la matière végétale n'est notable qu'avec la dose de 4000 kg ha⁻¹ où la CEC atteint 5 cmol(+) kg⁻¹. Bien que peu marqué pour le témoin, cet effet reste constant jusqu'en fin d'incubation.

4.3.3.3.2. Cations échangeables

L'évolution de la garniture cationique au cours de l'incubation est appréciée, pour chacun des deux sols étudiés, à partir des modifications non seulement des teneurs absolues (fig. 4.3-2), mais aussi des proportions relatives sur le complexe d'échange (fig. 4.3-3).

4.3.3.3.2.1. sol de la Vallée du Niari

Le calcium reste le cation dominant le complexe d'échange du sol témoin du Niari (NC01) où il représente 60% de la garniture cationique (fig. 4.3-3). Le manganèse occupe la seconde place avec 14%, suivi de l'aluminium (10%), puis du magnésium (8%). Le potassium, le sodium et les protons ne représentent chacun que 2% de la garniture cationique.

Cette répartition des cations sur le complexe évolue au cours de l'incubation. Les modifications portent surtout sur l'augmentation des teneurs en aluminium qui passent de 0,41 cmol(+) kg⁻¹ au début à 0,82 cmol(+) kg⁻¹ après

trois semaines et $1,1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ en fin d'incubation, soit une saturation du complexe en cet élément qui passe de 10% à 20% et 22% respectivement.

L'apparition de l'aluminium affecte surtout la saturation du complexe en manganèse, qui diminue de 14 à 8%, malgré des teneurs maintenues autour de $0,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$.

Le comportement du complexe est le même dans le sol avec incorporation de la matière végétale seule (MV). La teneur en potassium est doublée par rapport au sol témoin ; elle atteint $0,2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ et se maintient à cette valeur durant tout l'essai.

Dans le cas d'un **apport de 2000 kg ha^{-1}** de calcaire broyé, la teneur en calcium augmente de $2,3 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dans le témoin à $5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$; la saturation du complexe en calcium atteint alors 82 à 88% et s'y maintient pendant les huit semaines d'incubation. La teneur en magnésium et son taux de saturation demeurent dans les mêmes proportions que dans le sol sans apport, soit 3 à 4% . La teneur en potassium tombe à $0,05 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, soit moins de 1% du complexe d'échange jusqu'à la fin de l'essai. Les teneurs en manganèse baissent de $0,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ en début d'essai à $0,14-0,19 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ au bout de huit semaines, soit un passage de 8 à 4% de saturation du complexe. L'aluminium occupe les 2% du complexe d'échange.

L'adjonction de matière végétale à l'apport des 2000 kg ha^{-1} de calcaire broyé modifie surtout la teneur en potassium ; celle-ci passe de $0,05 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ dans le traitement avec apport de calcaire seul à $0,22 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, soit une augmentation du taux de saturation sur le complexe de 1% à 4%.

L'apport d'un équivalent de **4000 kg ha^{-1}** de calcaire broyé augmente les teneurs en calcium à 5,8 en début d'incubation à 6,7 et $7 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, avec des taux de saturation en calcium variant de 88 à 92% . Les autres éléments ne varient pas par rapport à l'apport 2000 kg ha^{-1} de calcaire, à l'exception du manganèse et de l'aluminium qui sont insolubilisés. En effet, la teneur en manganèse descend à $0,4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (valeur identique à celle du magnésium), avec un taux de saturation du complexe égal à 6%. Cette teneur tombe à $0,06$ et $0,09 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, soit environ 2% seulement du complexe d'échange. L'aluminium n'existe pratiquement plus sous forme échangeable.

L'incorporation simultanée de matière végétale avec cet apport équivalent à 4000 kg ha^{-1} ne modifie pas significativement les teneurs absolues en éléments ni leurs proportions relatives. Seules les teneurs en potassium sont modifiées : elles sont d'ailleurs identiques dans tous les traitements à matière végétale.

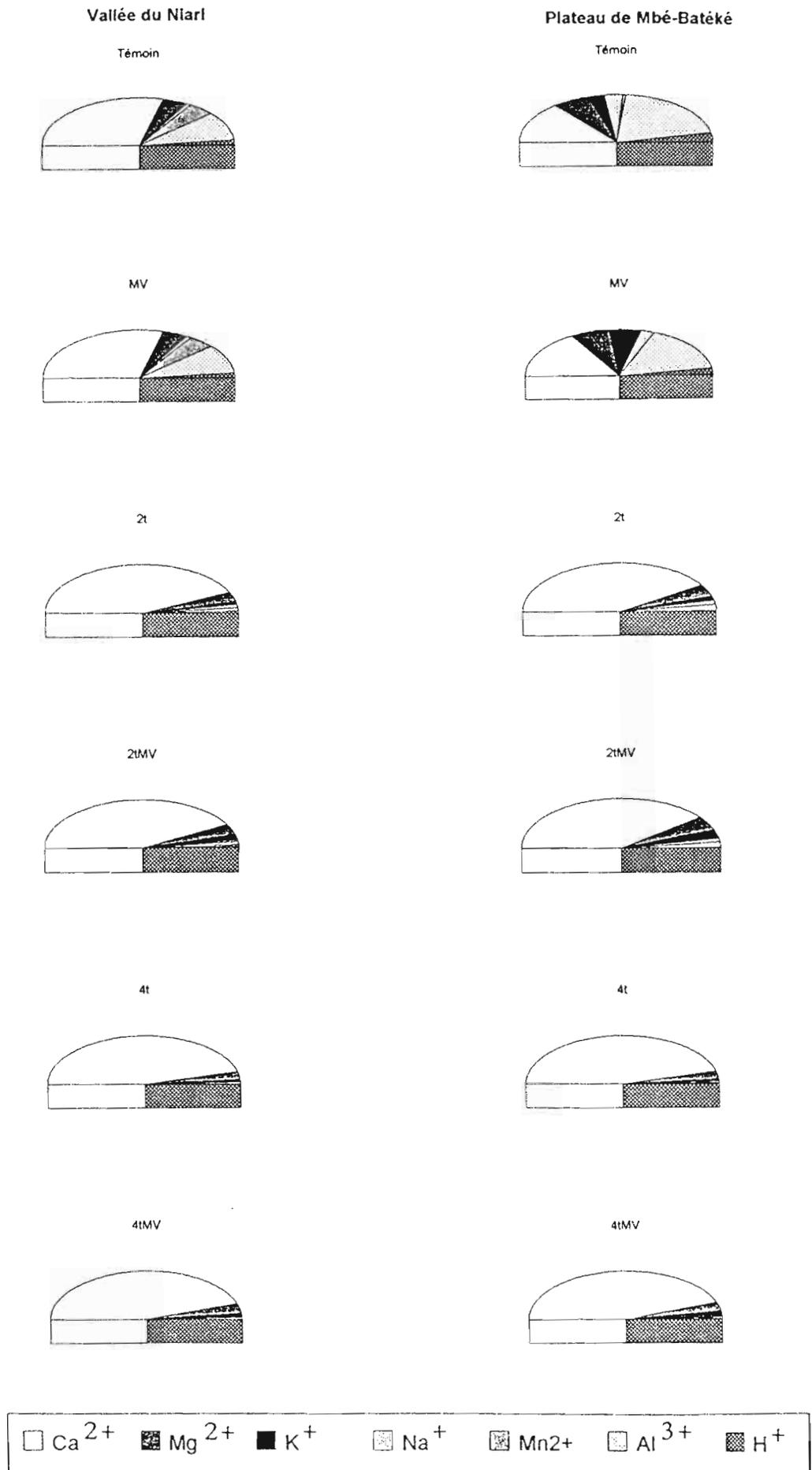


Figure 4.3-2 : Garniture cationique (en proportion relative) du complexe d'échange des sols du Niari et de Mbé-Batéké après trois semaines

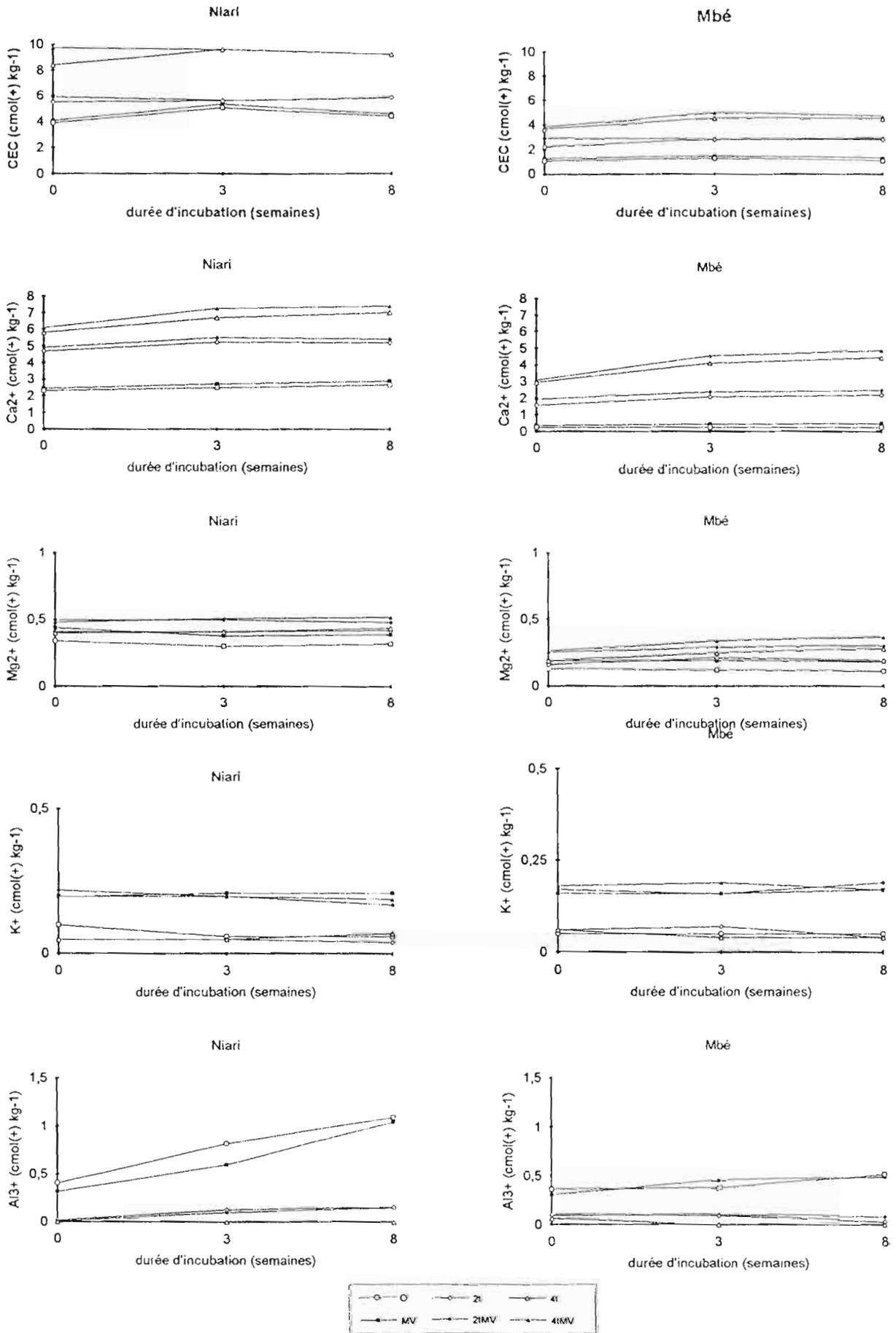


Figure 4.3-3 : Evolution de la CEC et des teneurs en cations majeurs échangeables des sols du Niari et du plateau de Mbé, au cours de l'incubation

4.3.3.2.2. sol du plateau de Mbé

Le spectre cationique du **sol témoin de Mbé-Batéké** diffère de celui du sol du Niari (Cf chapitre 1 et fig. 4.3-3). C'est l'aluminium qui prédomine, avec des teneurs de $0,4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ et un taux d'occupation du complexe de 40%. Le calcium, avec $0,24 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ n'occupe que 26% et le magnésium dont la teneur est de $0,13 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ n'en occupe que 14%, tandis que le potassium et le sodium, avec des teneurs de $0,05 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, représentent chacun 6% de la garniture cationique.

Ces teneurs et proportions relatives dans le sol témoin ne varient pratiquement pas au cours de l'incubation, à l'exception de l'aluminium.

L'incorporation de matière végétale remonte légèrement la teneur en calcium de $0,25$ à $0,36 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ et sa proportion de 26 à 32% ; la teneur en aluminium varie peu par rapport au sol témoin, mais sa proportion sur le complexe n'est plus que de 28%. Comme pour le sol du Niari, la teneur en potassium augmente remarquablement, de $0,05$ à $0,16 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, avec une augmentation de sa proportion de 4 à 14%. Ces teneurs varient très peu au cours de l'incubation. Seule l'augmentation de la teneur en aluminium qui avoisine $0,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ après huit semaines d'incubation, modifie les proportions relatives des éléments qui descendent à 24% pour le calcium, 10% pour le magnésium, 4% pour le potassium et 8% pour le sodium. Au contraire celle de l'aluminium remonte à 48%.

L'apport d'un équivalent de 2000 kg ha^{-1} augmente les teneurs en calcium de $0,24$ à $1,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, avec un taux de 82% de la garniture cationique. Malgré la faible élévation de sa teneur qui devient $0,16 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, le magnésium devient le second cation sur le complexe avec (8%), surtout en raison de la diminution de la teneur en aluminium ($0,1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) et de sa proportion relative (6%). Le potassium, dont la teneur ne varie pas par rapport au témoin, occupe 4% de la garniture cationique. A partir de la troisième semaine d'incubation, les teneurs en calcium et magnésium atteignent respectivement $2,1$ et $0,2 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, mais leurs proportions relatives demeurent constantes.

L'adjonction de *Pueraria* à cet équivalent de 2000 kg ha^{-1} de calcaire broyé améliore les teneurs en calcium, magnésium et potassium échangeables ; celles-ci sont alors respectivement de $1,93$, $0,25$, $0,17 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, soit dans l'ordre, 80, 10 et 6% de la garniture cationique. Les autres éléments ne sont pas perturbés et l'évolution des teneurs et proportions relatives se fait comme pour l'apport de calcaire seul.

Lorsque c'est un équivalent de **4000 kg ha⁻¹** de calcaire broyé qui est incorporé au sol, la teneur en calcium atteint 3 cmol(+) kg⁻¹, avec un taux d'occupation de 90%. La teneur en magnésium reste autour de 0,19 cmol(+) kg⁻¹ et sa proportion relative est de 6%. Le potassium dont la teneur est identique à celle du témoin sans apport (0,06 cmol(+) kg⁻¹) n'occupe que 2% du complexe, tout comme l'aluminium. Après trois semaines d'incubation, la teneur en calcium atteint 4,1 cmol(+) kg⁻¹, celle du magnésium 0,25 cmol(+) kg⁻¹ tandis que le potassium stagne et l'aluminium n'est plus sous forme échangeable. Le calcium et le magnésium augmentent encore légèrement en fin d'incubation, mais les proportions relatives restent inchangées.

L'adjonction de *Pueraria* à l'apport équivalent à 4000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé n'augmente que très légèrement le calcium échangeable, tandis que le magnésium et le potassium sont au même niveau que dans le sol avec apport de 2000 kg ha⁻¹ de calcaire couplé à la matière végétale. Les proportions relatives sont respectivement de 86, 8 et 4%. Comme dans le cas d'un apport de calcaire seul, les teneurs en calcium augmentent jusqu'à 4,9 cmol(+) kg⁻¹, mais les proportions relatives restent pratiquement inchangées.

4.3.3.4. Discussion et conclusion

Ce chapitre fait suite à la caractérisation de la réactivité des surfaces des sols ferrallitiques de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké ; il a été consacré à l'approche expérimentale de l'influence des doses croissantes et/ou de l'enfouissement de *Pueraria* sur quelques paramètres physico-chimiques du sol.

Partant du constat fait au §3.2. concernant la solubilisation de l'aluminium dans l'évolution de la CEC_T, et en s'appuyant sur une analyse bibliographique, ce travail a permis de conclure sur l'insuffisance des critères habituels utilisés pour la détermination des doses d'amendement calcaire.

Une méthode de détermination des doses requises d'amendement basée sur le pouvoir tampon du sol a donc été envisagée ; celle-ci tient compte des caractéristiques intrinsèques du sol (sites acides de surface, charges variables...).

La méthode par incubation constituant une référence, il ressort que les prévisions du pH concordent avec les valeurs effectivement obtenues sur le sol, en particulier pour les gammes de pH_{eau} en dessous de 6.

Une fois les problèmes de fixation des doses réglés, est apparue la question de la détermination des cations échangeables de ces sols acides après

qu'ils aient reçu un amendement calcaire. C'est la méthode au chlorure de cobaltihexammine qui est retenue pour l'évaluation des modifications du complexe d'échange (CEC et garniture cationique) à un instant donné. Cette méthode présente les avantages d'une solubilisation minimale du calcium et du magnésium de l'amendement d'une part et, d'autre part de la prise en compte de la variation du pH du sol qui, on le sait, influence la capacité d'échange.

Du point de vue méthodologique, il est apparu une impossibilité de doser avec précision les carbonates résiduels par les méthodes courantes (calcimètre Bernard ou attaque chlorhydrique avec titrage en retour par la soude) en raison de la faiblesse des quantités de carbonates incorporées dans le sol (< 0,5%).

Dans les conditions expérimentales de cette étude, il est apparu que les teneurs en carbone organique ne sont pas modifiées au bout des 12 semaines que dure l'incubation. La conséquence fondamentale de cette absence de variation des teneurs en matière organique est que les modifications de la réaction du sol et de son complexe d'échange sont bien *attribuables aux effets des doses de calcaire broyé et/ou de l'enfouissement de matière végétale*.

Les résultats obtenus ici font apparaître une rapidité d'action du calcaire broyé de Madingou qui se manifeste après seulement deux heures de contact à une humidité équivalant à celle couramment observée au champ.

On note ainsi après trois semaines d'incubation, une certaine «stabilisation» de la tendance générale du complexe, qui varie peu jusqu'à la fin de l'incubation qui dure 12 semaines.

Il ressort que l'apport de 2000 kg ha⁻¹ relève le pH de près d'une unité dans le sol du Niari et seulement de 0,6 unité dans celui du plateau de Mbé. Par contre avec la dose de 4000 kg ha⁻¹ l'augmentation du pH atteint 2,2 unité dans le sol du plateau de Mbé, mais seulement 1,6 unité dans le sol du Niari. L'incorporation de matière végétale ne modifie pas significativement l'action du calcaire sur le pH.

De façon similaire, la CEC n'est augmentée que par les apports de calcaire.

Le spectre cationique du sol est modifié par les apports. Les effets des deux types d'apport se manifestent donc principalement par :

- une élévation du pH due à la dissolution des carbonates du calcaire broyé,
- une modification de la garniture cationique du complexe par des apports de Ca²⁺ et Mg²⁺ par le calcaire et surtout de K⁺ par le *Pueraria*.

Ces modifications se répercutent sûrement sur la dynamique des éléments minéraux à l'interface sol/solution, dynamique qu'il convient à présent d'étudier. C'est l'objet du chapitre 5 qui suit.

A l'issue de cette étude, un bilan global sera fait sur le devenir des éléments majeurs du sol (Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+) tels qu'ils sont affectés par les différents apports.

**MODIFICATIONS DE LA DYNAMIQUE D'ÉCHANGE D'IONS PAR
LA CORRECTION DE L'ACIDITÉ**

«La prise en compte de la composition de la solution, et en particulier des équilibres chimiques entre la phase solide et la phase liquide, est une nécessité si l'on veut comprendre et prévoir le comportement et l'organisation des matériaux» (TESSIER et PEDRO, 1984).

Les apports de calcaire et/ou de *Pueraria* modifient le complexe d'échange des sols étudiés (pH, capacité d'échange, cations échangeables...). Il paraît judicieux d'apprécier les répercussions de ces modifications sur la dynamique des éléments minéraux.

Aussi, des tests de comportement utilisant des approches complémentaires sont réalisés à partir du sol incubé pendant trois semaines. La susceptibilité du sol à libérer des éléments dans la solution du sol est appréciée par des études de lixiviation d'une part, et des cinétiques de séparation des éléments du sol par électrodialyse, d'autre part.

Les résultats de ces études, associés aux déterminations concernant les cations échangeables à la cobaltihexammine, permettent d'affiner l'estimation de la mobilité et de la disponibilité des éléments minéraux pour les plantes, estimation dont on recherche ensuite la validation par les déterminations des éléments absorbés par une plante-test, le *ray grass* d'Italie, cultivée sous serre en vases de végétation.

5.1. ESSAI D'APPRECIATION DES PERTES PAR LIXIVIATION

L'essai d'incubation précédemment étudié présente l'inconvénient d'apprécier les différents paramètres observés dans des conditions idéales de «pluies utiles», où toute l'eau qui tombe reste dans le profil. Or, il est bien connu que dans les conditions climatiques de ces deux zones de plateau, une partie non négligeable des précipitations percole, entraînant hors du profil une partie des éléments nutritifs pour les cultures.

Il a donc paru opportun de mener un essai d'incubation avec percolations intermittentes.

5.1.1. CONDUITE DE L'ESSAI

5.1.1.1. Protocole expérimental

Comme dans l'essai précédent, les échantillons de sol sont issus des horizons de surface des sols du Niari (NC01) et du plateau de Mbé-Batéké (BS1) et les traitements mis en oeuvre sont :

- 0 : sol témoin,
- MV = enfouissement d'un équivalent de 4800 kg ha⁻¹ de matière végétale,
- 2t = apport d'un équivalent de 2000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé,
- 2tMV = 2000 kg ha⁻¹ de calcaire + 4800 kg ha⁻¹ de matière végétale,
- 4t = apport d'un équivalent de 4000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé,
- 4tMV = 4000 kg ha⁻¹ de calcaire + 4800 kg ha⁻¹ de matière végétale.

Le calcaire et la matière végétale sont ajoutées au sol dans un tube bouché et l'ensemble est mélangé avec un mouvement complexe de rotation et de balancement rythmé (mélangeur *Turbula*).

Le sol ainsi préparé est transféré dans un entonnoir de Büchner en polypropylène. La prise d'essai est de $50 \pm 0,01$ g et le sol est retenu dans l'entonnoir par un filtre en fibre de verre.

Afin d'avoir une vitesse de percolation constante pendant toute la durée de l'essai, il a été nécessaire de mélanger à parts égales du sol argileux de la Vallée du Niari avec du sable (sable de mer purifié à l'acide et calciné pour analyse, MERCK, calibré entre 0,1 et 0,3 mm).

Le sol est humecté à l'eau pure (milli-Q) et mis à incuber pendant trois semaines à une humidité correspondant au pF 2,5, dans une étuve biologique où la température est maintenue à 25 ± 2 °C.

Après trois semaines d'incubation débute l'essai «percolation - lixiviation» proprement dit. L'entonnoir est posé sur une fiole à filtrer sous vide, l'humectation se fait par gravité et le percolat est recueilli par écoulement libre dans la fiole.

La simulation de la lixiviation dure six semaines, à raison d'une percolation par semaine. Les quantités d'eau percolantes reflètent les précipitations de la saison humide, soit en moyenne 50 mm par semaine. Pour chaque échantillon de 50 g, occupant un volume de 40 cm^3 (densité apparente 1,25) correspondant à l'horizon de surface de 10 cm d'épaisseur, ces précipitations hebdomadaires équivalent à un apport de 20 mL d'eau.

Un essai préliminaire a permis de fixer les conditions opératoires : on obtient un premier écoulement après 2 minutes ; les 20 mL d'eau sont ajoutés en 4 x 5 mL à 0, 2, 5 et 8 minutes, dans le double but d'éviter un engorgement trop important et un arrêt de l'écoulement. A la fin de la percolation qui dure 30 mn, l'humidité de l'échantillon est réajustée par succion à la trompe à vide à un potentiel d'eau de -30 kPa (équivalent à pF 2,5). Par ajout d'eau tous les deux jours, après contrôle par pesée, l'humidité du sol est maintenue à cette valeur entre deux percolations.

5.1.1.2. Analyses

Les mesures de pH et des concentrations en anions et cations (y compris Mn^{2+} et Al^{3+}) permettent d'apprécier les modifications subies par l'eau qui a percolé à travers le sol.

La rapidité de passage des solutions au dosage permet de réduire les modifications intempestives et garantit la stabilité des résultats (VIAUX, 1981).

Tous les dosages sont effectués en chromatographie ionique au DIONEX pour les anions et en spectrométrie d'absorption atomique en flamme pour les cations. Seul, l'aluminium est dosé par colorimétrie (méthode à l'aluminon, sel ammoniacal de l'acide vaurinetricarboxylique : $C_{22}H_{23}N_3O_9$) ; l'intensité de la coloration rouge-orangé, proportionnelle à la concentration en aluminium, est mesurée à la longueur d'onde de 540 nm.

La mesure exacte des volumes percolés permet de calculer les pertes en éléments minéraux du sol et de les exprimer en $cmol(+) kg^{-1}$ de sol. Un traitement statistique des données (analyse de variance, comparaison des moyennes) est réalisé à l'aide du logiciel STATGRAPHICS (STSC, 1991).

5.1.2. RESULTATS

Les volumes recueillis par percolation, voisins de 16 mL, sont restés quasi-constants durant les six semaines de l'essai pour les deux sols.

L'évolution de la charge ionique des percolats, sans modification notable de la dynamique de l'eau (temps d'écoulement et volumes percolés constants), permet de comparer les pertes des sols en cations et anions suivant les traitements appliqués.

5.1.2.1. pH des percolats

Les variations du pH des percolats sont très voisines pour les témoins des deux sols. Le pH des percolats, en moyenne de 6,2 pendant la première semaine, baisse dès la deuxième percolation, atteint un plancher compris entre pH 5,1 et 5,5 puis remonte à son niveau initial à partir de la cinquième percolation (fig. 5.1-1).

Avec un apport de *Pueraria*, les variations du pH des percolats sont sensiblement les mêmes que celles du sol témoin.

On note par contre une augmentation et une relative stabilité des valeurs de pH dans les percolats des sols recevant du calcaire. L'augmentation du pH est d'autant plus importante que la dose apportée est forte : $6,5 < pH < 7$ pour un apport correspondant à $2000 kg ha^{-1}$ et $7 < pH < 7,5$ pour un équivalent de $4000 kg ha^{-1}$. Ces résultats corroborent ceux obtenus par NZILA (1986) sur un sol acide de la Vallée du Niari. La stabilité du pH des percolats des sols avec apport de calcaire peut être attribuée au rôle de tampon joué par le calcaire.

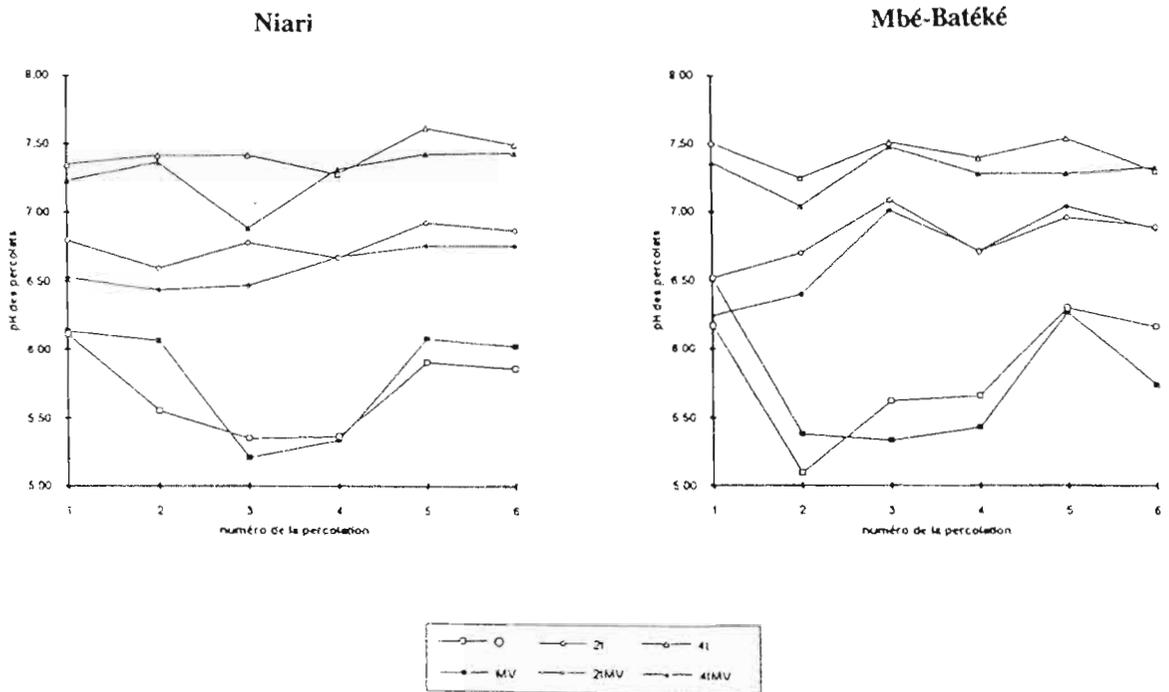


Figure 5.1-1 : Evolution du pH des percolats des sols de la Vallée du Niari et du Plateau de Mbé

En cas d'apport combiné, l'incorporation de *Pueraria* limite l'effet du calcaire broyé en diminuant légèrement le pH des percolats (environ 0,2 unité). Cette diminution du pH est à mettre en relation avec la minéralisation de la matière organique (production de protons et d'acides divers).

5.1.2.2. Quantités de cations lixiviés

Le tableau 5.1-1 indique les effets des différentes doses de calcaire et/ou de l'incorporation de *Pueraria* sur les pertes cumulées en éléments dans chacun des deux sols étudiés. La comparaison de ces pertes, pour un traitement donné, par rapport au sol témoin est présentée dans l'annexe A5.

Dans le sol de la Vallée du Niari, les pertes en cations majeurs du sol témoin sont de 0,22, 0,05 et 0,03 cmol(+) kg⁻¹, respectivement pour le calcium, le magnésium et le potassium. Dans le sol du Plateau de Mbé-Batéké, celles-ci sont respectivement de 0,05, 0,03 et 0,04 cmol(+) kg⁻¹.

5.1.2.2.1. Calcium

Dans le sol de la Vallée du Niari, les apports de calcaire augmentent

significativement les pertes en calcium qui sont multipliées par 1,8 et 2,7 respectivement pour les doses de 2000 et 4000 kg ha⁻¹. L'enfouissement de l'équivalent de 4800 kg ha⁻¹ de matière sèche de *Pueraria* seul, n'a pas d'effet significatif. Il existe cependant une certaine synergie des effets de l'apport de calcaire et l'enfouissement de *Pueraria*, car la combinaison calcaire-*Pueraria* triple les pertes en calcium.

Tableau 5.1-1 : Quantités cumulées des cations et anions lixiviés

traitements		Eléments lixiviés (cmol kg ⁻¹)							
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
N	Témoin	0,22	0,05	0,03	0,16	0,02	0,40	0,03	
	MV	0,27	0,07	0,07	0,16	0,07	0,53	0,04	
	i	2t	0,39	0,06	0,02	0,09	0,02	0,34	0,04
	a	2tMV	0,65	0,09	0,06	0,11	0,04	0,64	0,05
	r	4t	0,59	0,06	0,02	0,09	0,02	0,42	0,05
i	4tMV	0,79	0,08	0,05	0,09	0,03	0,63	0,06	
M	Témoin	0,05	0,03	0,04	0,18	0,04	0,19	0,04	
	MV	0,07	0,05	0,14	0,18	0,06	0,34	0,03	
	b	2t	0,22	0,05	0,03	0,12	0,03	0,17	0,04
	é	2tMV	0,22	0,06	0,12	0,13	0,03	0,24	0,04
		4t	0,35	0,07	0,03	0,09	0,07	0,38	0,08
	4tMV	0,37	0,06	0,17	0,10	0,08	0,62	0,10	

Dans le sol du Plateau de Mbé, les apports de doses croissantes de calcaire augmentent fortement les pertes en calcium par lixiviation ; celles-ci atteignent en effet quatre et sept fois celles du témoin. L'enfouissement de matière végétale seule n'augmente pas significativement ces pertes, et combiné à l'apport de calcaire, modifie peu l'effet de ce dernier.

5.1.2.2.2. Magnésium

Dans le sol de la Vallée du Niari, l'amendement calcaire modifie peu les pertes en magnésium ; celles-ci restent en moyenne de $0,06 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ quelle que soit la dose apportée, contre $0,05 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ pour le témoin. L'incorporation de *Pueraria* au sol augmente une fois et demi ces pertes. En cas d'apport combiné, il existe une certaine additivité des effets des différents apports.

Dans le sol du Plateau de Mbé, tout apport entraîne une augmentation des pertes en magnésium. Celles-ci atteignent environ deux fois ($0,5$ à $0,7 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) celles du témoin ($0,3 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) quel que soit l'apport fait au sol.

5.1.2.2.3. Potassium

Dans les deux sols étudiés, l'apport de calcaire réduit légèrement les pertes en potassium, tandis que l'enfouissement de *Pueraria* les double (sol du Niari) ou les triple (sol de Mbé).

Les effets antagonistes du calcaire et du *Pueraria* se manifestent, en cas d'apport combiné, par des pertes intermédiaires de celles des apports seuls.

5.1.2.2.4. Sodium

Les pertes en sodium obtenues dans ce type d'expérimentation sont très importantes si on les compare, par exemple, aux valeurs de sodium échangeable. L'existence d'artefacts n'est pas exclue. On peut simplement noter que par rapport au témoin, l'enfouissement de matière végétale n'a pas d'effet tandis que les apports de calcaire limitent ces pertes.

5.1.2.2.5. Aluminium et manganèse

On ne trouve l'aluminium en solution que dans les deux premiers percolats du sol de la Vallée du Niari. Les quantités lixiviées, en moyenne de $0,11 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ pour le témoin, ne sont pas modifiées par l'apport de calcaire, mais légèrement augmentées par l'enfouissement de matière végétale ($0,16 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$).

Le manganèse, bien que présent en quantité importante dans le sol de la Vallée du Niari, n'a pas été mis en évidence dans les percolats de sol et ne semble donc pas du tout perdu par lixiviation.

5.1.2.3. Quantités d'anions lixiviés

Les anions perdus par lixiviation sont essentiellement les nitrates (tableau 5.4.1). Les percolats ne contiennent pas de phosphates et les volumes recueillis (16 mL) n'ont pas permis le dosage des bicarbonates (titrage à l'acide sulfurique nécessitant au moins 20 mL).

5.1.2.3.1. Nitrates

Les pertes en nitrates sont de 0,4 cmol(+) kg⁻¹ pour le sol témoin du Niari et de 0,2 cmol(+) kg⁻¹ pour celui du Plateau de Mbé.

Dans le sol de la Vallée du Niari, l'apport de calcaire broyé stabilise ces pertes, tandis que l'incorporation de *Pueraria* seul les multiplie par 1,3 ; on note une synergie des effets qui aboutit à des pertes de 0,6 cmol(+) kg⁻¹ lorsque l'apport de matière végétale est combiné à celui de calcaire et ce, quelle que soit la dose envisagée.

Dans le sol du Plateau de Mbé, l'apport de 2000 kg ha⁻¹ de calcaire n'a pas d'effet significatif sur les pertes en nitrates (facteur 0,8), alors que celles-ci sont doublées par un apport de 4000 kg ha⁻¹. L'enfouissement de *Pueraria* multiplie ces pertes par 1,7. La combinaison des apports confirme l'effet légèrement limitant (antagonisme) de l'apport de 2000 kg ha⁻¹ de calcaire, mais fait ressortir une synergie avec celui de 4000 kg ha⁻¹.

5.1.2.3.2. Chlorures

Dans le sol de la Vallée du Niari, les pertes en chlorures sont de l'ordre de 0,03 cmol(+) kg⁻¹ pour le témoin et seul l'apport de *Pueraria* les augmente significativement (multiplie par 3) par rapport au témoin. Il existe un antagonisme calcaire - matière végétale sur les pertes en chlorures par les sol.

Dans le sol du Plateau de Mbé, la lixiviation des chlorures est identique à celle des nitrates : les pertes, du même ordre de grandeur que dans le sol du Niari, ne sont aggravées que par l'incorporation de matière végétale et par l'apport de 4000 kg ha⁻¹ de calcaire (jusqu'à deux fois le témoin), avec en plus une synergie des effets de ces deux apports.

5.1.2.3.3. Sulfates

Pour le sol de la Vallée du Niari, tout apport augmente les pertes en sulfates, mais seul est significativement différent l'effet de la combinaison de 4000 kg ha⁻¹ avec le *Pueraria*, qui double les pertes en sulfates par rapport au témoin

(0,03 à 0,06 cmol(+) kg⁻¹).

Dans le sol du Plateau de Mbé, seul l'apport élevé de calcaire (4000 kg ha⁻¹) augmente les pertes en sulfates (0,04 cmol(+) kg⁻¹).

5.1.2.4. Balance ionique des percolats

La balance ionique des percolats est présentée dans le tableau 5.1-2.

En dépit de l'absence de mesures portant sur les bicarbonates et compte-tenu des limites de sensibilité des techniques d'analyses utilisées, la correspondance entre la somme des cations et celle des anions analysés est bonne. Les paramètres suivis semblent donc bien révéler les modifications de la composition des percolats consécutives aux traitements subis par le sol. OLIVER (1991) aboutit à la même conclusion, dans une étude en colonne de terre, de la dynamique des cations sur un sol de la Vallée du Niari.

Tableau 5.1-2 : Quantités cumulées des cations et anions lixiviés

Traitements	Vallée du Niari		Plateau de Mbé	
	cations	anions	cations	anions
	cmol kg ⁻¹			
Témoin	0,47	0,45	0,30	0,26
MV	0,57	0,64	0,44	0,43
2t	0,56	0,41	0,42	0,24
2tMV	0,90	0,74	0,53	0,32
4t	0,76	0,49	0,56	0,53
4tMV	1,01	0,72	0,74	0,80

5.1.3. DEVENIR DES ELEMENTS APPORTES : ESSAI DE BILAN

Cet essai de bilan porte sur les trois cations majeurs ajoutés au sol par les différents apports. Connaissant les quantités équivalentes apportées par le calcaire et/ou le *Pueraria*, il est possible d'esquisser un bilan sur le devenir des éléments apportés. L'objectif est de savoir si ce qui est apporté est lixivié, retenu

par la phase solide du sol sous forme échangeable ou demeure immobilisé.

Ce bilan peut être effectué sur trois compartiments différents correspondant aux éléments :

- «lixiviables», susceptibles d'être entraînés par les eaux percolant à travers le sol,

- «échangeables», plus ou moins fortement adsorbés sur le complexe,

- «immobilisés», qui peuvent comprendre aussi bien la fraction non décomposée ou non dissoute de l'apport, que des éléments insolubilisés par suite des apports réalisés, ou très fortement retenus par la phase solide du sol.

Les équivalents apportés correspondent aux valeurs déterminées au § 4.3 à partir de la composition chimique du calcaire broyé et du *Pueraria*.

La quantité lixiviable L est obtenue par différence entre les quantités lixiviables du témoin et des traitements respectifs ($L = L_{\text{traitement}} - L_{\text{témoin}}$).

Le compartiment échangeable est également calculé par différence entre témoin et traitements considérés (cations échangeables déterminés par la méthode à la cobaltihexammine (Cf § 4.3) sur le sol incubé pendant trois semaines), valeur de laquelle on retranche la quantité lixiviable correspondante ($E = E_{\text{traitement}} - E_{\text{témoin}} - L$).

La fraction immobilisée est égale à l'équivalent apporté diminué des quantités échangeable et lixiviable ($I = \text{Eq. app.} - E - L$).

Pour un traitement donné, un apport fait au sol ne se traduit pas toujours par un accroissement des quantités lixiviables ou échangeables d'un élément. En effet, les valeurs négatives de L ou E sont indicatrices d'une limitation de la lixiviation d'un élément ou de sa «rétrogradation» (non-échangeabilité), ce qui met en évidence l'effet des traitements sur la mobilité de l'élément.

La figure 5.1-2 présente les données ainsi traitées, dont le détail est donné en annexe (tableau A5).

Concernant le calcium :

Il en ressort que le calcium apporté par le calcaire passe surtout dans le compartiment échangeable : cette fraction représente de 65 à 85% de l'apport dans le sol de la Vallée du Niari et de 50 à 65% dans celui du Plateau de Mbé. La fraction lixiviable reste faible, inférieure à 10% de l'apport. La fraction immobilisée est sensiblement plus forte dans le sol du Plateau de Mbé.

Le calcium apporté par le *Pueraria* seul est plutôt immobilisé (80% de

la quantité apportée), sûrement en raison d'une mauvaise décomposition de la matière végétale dans les conditions de pH bas qui prévalent dans le sol sans apport de calcaire. La fraction décomposée alimente surtout le pool échangeable.

L'apport simultané de calcaire et de *Pueraria* accroît surtout le pool échangeable de calcium (64 à 68% pour le Niari et 48 à 58% pour Mbé).

Concernant le magnésium :

Le magnésium apporté au sol par la dose 2000 kg ha⁻¹ de calcaire alimente surtout le pool échangeable (58% de l'équivalent apporté dans le sol du Niari et 41% dans celui de Mbé) ; mais ce pool n'est pas accru de façon sensible par la dose de 4000 kg ha⁻¹. C'est plutôt la fraction immobilisée qui augmente (68% de l'apport au Niari et 62% à Mbé).

Le magnésium apporté par l'enfouissement de *Pueraria* est surtout échangeable (50 à 60% de l'apport).

L'effet «dose de calcaire» est confirmé sur les traitements combinant les deux apports, le pool échangeable n'augmentant pas quand la dose de calcaire passe de 2000 à 4000 kg ha⁻¹.

Bien que les quantités lixiviées soient faibles, le magnésium est proportionnellement plus lixivié que le calcium (6 à 20%).

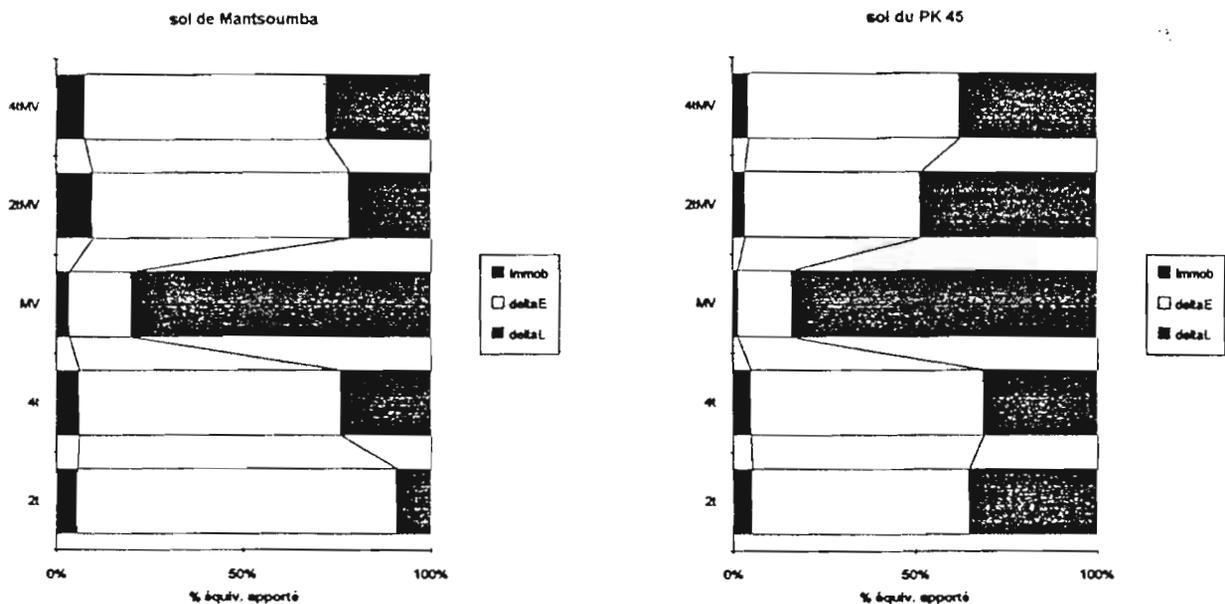
Concernant le potassium :

Le calcaire broyé n'apporte pas de potassium, mais provoque une diminution de la lixiviation de ce dernier (voir tableau A5 en annexe).

L'enfouissement de *Pueraria* alimente surtout la fraction échangeable du potassium dans le sol du Niari (78 à 86% de l'apport). Dans le sol du Plateau de Mbé par contre, le potassium apporté est surtout perdu par lixiviation (57 à 71%).

Ces modifications de la mobilité des éléments minéraux dans le sol recevant différents apports se répercutent sur les rapports Ca/Mg et Ca/K. Il est à craindre qu'un apport de calcaire broyé de Madingou accroisse le déséquilibre Ca/Mg déjà très fort existant dans le sol du Niari. De même, l'enfouissement de *Pueraria* diminue notablement le rapport Ca/K dans ce sol du Niari (où le potassium apporté par le *Pueraria* se retrouve surtout sous forme échangeable) mais vraisemblablement très peu dans celui de Mbé-Batéké (où le potassium apporté est fortement lixiviable).

Bilan du calcium apporté dans le sol



Bilan du magnésium apporté

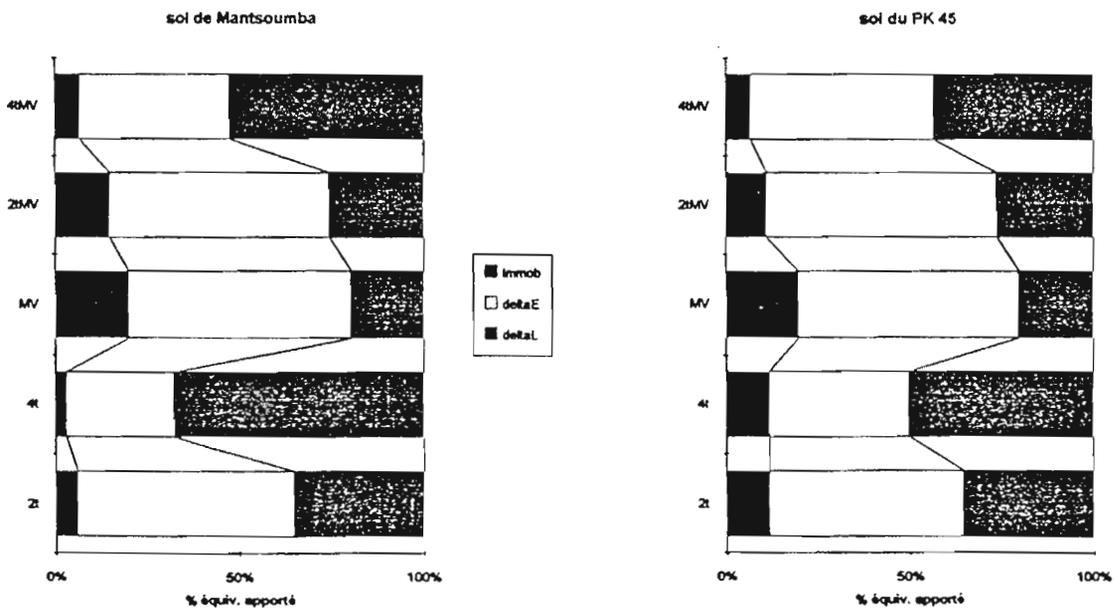


Figure 5.1-2 : Bilan du calcium et du magnésium apporté au sol

En définitive, le calcium reste le plus lixivié des cations majeurs et, en l'absence de détermination des teneurs en bicarbonates, le nitrate apparaît comme l'anion accompagnateur le plus important. Cette lixiviation constitue donc bien un facteur important de l'acidification du sol comme l'ont indiqué HELYAR et PORTER (1989).

Ce type de bilan permet donc, en première approximation, non seulement de connaître le devenir de l'apport mais aussi, éventuellement, l'influence de cet apport sur le sol lui-même.

Cet essai a permis d'apprécier les quantités d'éléments que le sol est susceptible de «relâcher» de l'horizon supérieur. Ces éléments, dissous dans l'eau en écoulement libre se déplacent par convection et peuvent être interceptés par les racines des plantes. Or ces dernières s'alimentent également à partir d'une solution dans laquelle les éléments se déplacent par diffusion. D'où l'intérêt de compléter l'appréciation de la mobilité des ions par séparation sous l'effet d'un champ électrique par la technique de l'électrodialyse et de compléter cette caractérisation par la mesure de l'absorption par une culture de *ray grass*.

5.2. SEPARATION DES ELEMENTS DU SOL PAR ELECTRODIALYSE

Les ions retenus par attraction électrostatique sur les colloïdes du sol peuvent passer en solution où ils servent à l'alimentation minérale des plantes (CALLOT et *al*, 1982 ; MENGEL et KIRKBY, 1982 ; DELVAUX, 1988 ; CHAMAYOU et LEGROS, 1989). Un courant électrique peut séparer ces ions du sol et permettre ainsi d'étudier leur disponibilité pour les plantes cultivées.

5.2.1. MATERIELS ET METHODES

5.2.1.1. Echantillons de sol

L'étude porte uniquement sur les sols de la Vallée du Niari. Dans le but d'avoir des situations bien contrastées, les quatre traitements retenus sont :

- sol seul (NC01)
- sol + équivalent 4800 kg ha⁻¹ de *Pueraria* (MV)
- sol + équivalent 4000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé (4t)
- sol + calcaire + *Pueraria* (4tMV).

Ces échantillons sont issus de l'essai d'incubation réalisé au §4.3 et ont été incubés durant trois semaines à une humidité correspondant au pF 2,5 et à une température de 25 ± 2 °C. Il a déjà été noté qu'après trois semaines d'incubation dans de telles conditions d'humidité et de température, les effets des traitements sont bien marqués (Cf §4.3).

5.2.1.2. Technique de l'électrodialyse

La séparation par électrodialyse consiste à faire migrer, sous l'influence d'un champ électrique continu, des particules électriquement chargées à travers des membranes artificielles, imperméables à l'eau mais perméables aux anions (membrane anionique) ou aux cations (membrane cationique).

Le montage adopté ainsi que les principes de cette méthode ont été décrits par DOULBEAU (1991) : les membranes cationiques utilisées portent un groupement fonctionnel acide sulfonique ($-\text{SO}_3^-$) et les membranes anioniques, un groupement ammonium quaternaire ($-\text{NH}_3^+$). Celles-ci doivent leurs propriétés sélectives à l'existence d'une différence de potentiel à l'interface membrane/solution qui s'oppose à la pénétration d'ions de même signe que le groupement fonctionnel, selon le principe de l'équilibre de DONNAN. Pour cette étude, les membranes cationiques sont saturées par Na^+ et les membranes anioniques par Cl^- .

Le dispositif comprend cinq compartiments séparés par des membranes cationiques ou anioniques suivant le schéma présenté sur la figure 5.2-1.

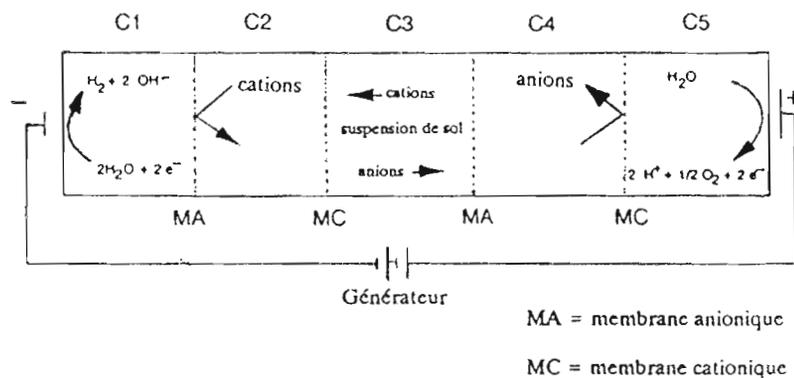


Figure 5.2-1 : Schéma de principe de la cellule d'électrodialyse utilisée.

Un générateur d'électrophorèse dont la sortie est stabilisée à 80 mV, est relié à deux électrodes plongées dans les compartiments C1 et C5.

Le compartiment central C3 contient de l'eau distillée dans laquelle le sol est mis en suspension, à raison de 13,5 g de sol pour 135 mL d'eau, soit un rapport sol/solution de 1/10.

Les compartiments adjacents C2 et C4 contiennent une solution tampon d'acide acétique-acétate de sodium 0,4 M à pH 4,6.

Les deux compartiments extrêmes, C1 et C5 dans lesquelles plongent

respectivement la cathode et l'anode, contiennent des solutions de NaCl à 1 mmol L^{-1} . Les conséquences de la formation d'ions H^+ et OH^- aux électrodes de ces deux compartiments sont atténuées d'une part, en fixant le pH des solutions et d'autre part, en diluant les solutions respectives dans une réserve de 2 000 mL à l'aide d'une pompe péristaltique. Les conditions fixées sont les suivantes : pH 2,7 ajusté avec $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ M}$ pour le compartiment C1 et pH 11,3 ajusté avec NaOH M pour le compartiment C5.

Ce montage préserve ainsi le compartiment central C3 de toute modification de pH et permet de suivre la cinétique de libération des éléments ionisés sous l'effet du passage de courant électrique.

5.2.1.3. Traitement des données

Sous l'effet du passage du courant électrique, les particules porteuses de charges (ions) migrent séparément, les cations vers la cathode, les anions vers l'anode.

Le passage du courant étant instantané, un premier prélèvement est effectué dès que la tension électrique est appliquée (au temps t_0). L'intensité du courant (en mA) est notée toutes les quinze minutes et un prélèvement de 2 mL de solution est effectué toutes les heures pendant huit heures.

Le dosage des cations est réalisé pour les compartiments C2 et C3 tandis que celui des anions concerne C3 et C4. Une correction est faite pour tenir compte de la diminution du volume après chaque prélèvement et les résultats sont exprimés en cmol kg^{-1} de sol.

Les quantités cumulées d'éléments séparés du sol et transportés en fonction du temps peuvent aussi être exprimées en fonction de la quantité de courant ayant traversé le dispositif. Celle-ci est calculée par la formule $q = I \times t \times 0,06$ coulombs.

5.2.2. RESULTATS ET DISCUSSION

Les contrôles effectués au cours de la séparation montrent que la température se maintient entre 22 et 25 °C et le pH reste stable jusqu'à la fin de la manipulation. L'efficacité du dispositif pour la préservation des conditions physico-chimiques dans le compartiment central fait que les résultats obtenus illustrent bien une dynamique de désorption due simplement au passage du courant.

La présentation des résultats ne porte ici que sur les quantités des cations majeurs recueillis dans le compartiment C2.

Au cours de la séparation, on note une diminution des concentrations en éléments dans le compartiment central tandis qu'elles augmentent dans le compartiment C2. Selon la garniture ionique des échantillons testés, l'intensité du courant et, partant, les quantités de courant traversant la cellule ne sont pas identiques.

Les courbes de la figure 5.2-2 indiquent les quantités cumulées de cations mesurées dans le compartiment C2, c'est-à-dire désorbés pour chaque traitement, en fonction de la quantité d'électricité.

Les quantités séparées après le passage de 200 coulombs sont prises comme références pour comparer les traitements appliqués au sol.

Le tableau 5.2-1 donne les quantités désorbées des trois éléments majeurs selon le traitement reçu par le sol.

Tableau 5.2-1 : Quantités séparées par électrodialyse des trois éléments majeurs du sol après passage de 200 coulombs dans la cellule.

élément	NC01	MV	4t	4tMV
	cmol(+) kg ⁻¹			
Ca ²⁺	2,45	1,38	3,86	2,80
Mg ²⁺	0,28	0,29	0,26	0,31
K ⁺	0,28	0,41	0,18	0,28

Il apparaît que par rapport au sol témoin, les quantités de calcium séparées par électrodialyse sont nettement supérieures lorsqu'il y a apport de calcaire, plus faibles avec l'apport de *Pueraria*.

La séparation du magnésium ne semble pas être influencée par les apports réalisés au sol.

La dynamique d'échange du potassium est, quant à elle, opposée à celle du calcium ; l'enfouissement de *Pueraria* augmente les quantités de potassium séparées par électrodialyse tandis que l'apport de calcaire broyé les abaisse fortement.

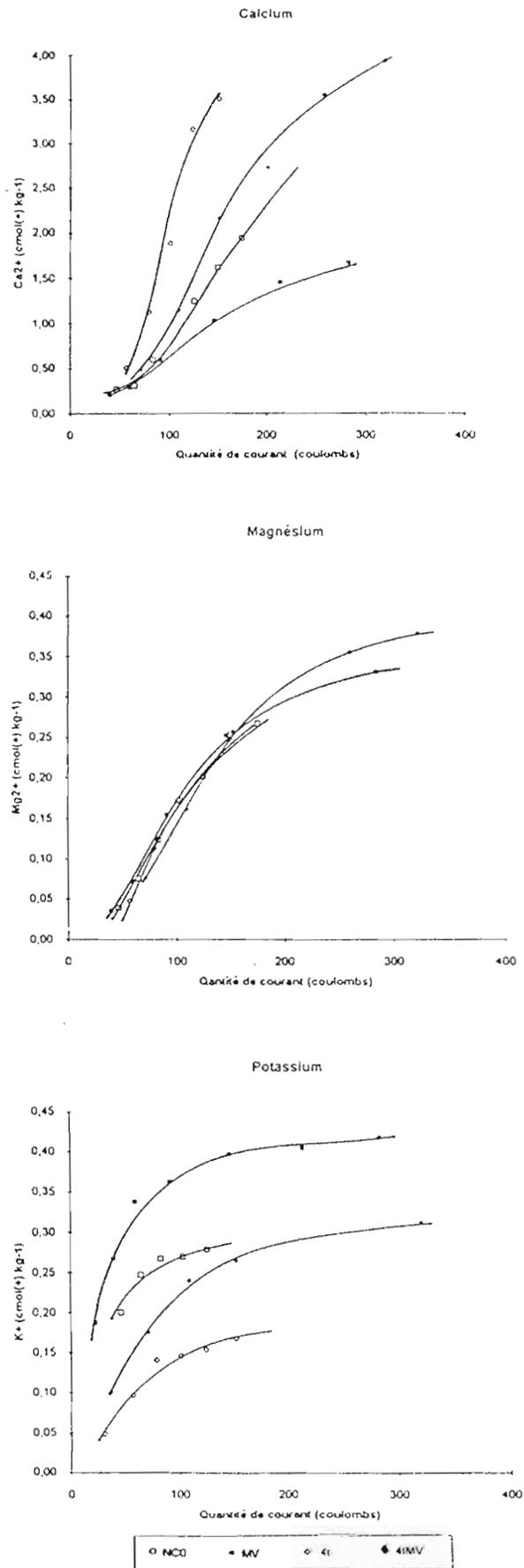


Figure 5.2-2: Quantités de cations séparées (compartiment C2) pour les quatre traitements en fonction de la quantité d'électricité ayant traversé le dispositif.

La séparation par électrodialyse met en évidence des interactions existant entre la dynamique d'échange de Ca et K, interactions qui sont cependant différentes dans leurs répercussions de celles enregistrées dans l'appréciation des pertes par lixiviation (l'apport de *Pueraria* seul ne réduisait pas la lixiviation du calcium) et qui n'apparaissent pas du tout dans les déterminations de cations échangeables (Cf 4.3).

Cette méthode permet d'estimer la mobilité des éléments du sol, estimation qu'il convient à présent de confronter aux possibilités d'absorption de ces mêmes éléments par une plante-test.

5.3. PRELEVEMENT DES ELEMENTS MINERAUX PAR UNE PLANTE-TEST

Les valeurs extrêmes de pH sont génératrices de contraintes minérales pour la plante qui se traduisent par des déficiences et des toxicités de certains ions biogènes ou non. Dans la nature, les végétaux réagissent diversement et se spécialisent suivant les biotopes ; dans les agrosystèmes par contre, en vue d'assurer aux cultures de bonnes conditions de croissance, on est amené à corriger le pH.

Après avoir étudié les modifications de la mobilité des éléments minéraux, ce travail essaie d'en apprécier les possibilités d'absorption par une plante test, le *ray grass* d'Italie (*Lolium multiflorum L.*).

5.3.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Tout comme pour l'électrodialyse, l'étude porte sur le sol du Niari (NC01) incubé pendant trois semaines dans les conditions de température et d'humidité définies au §4.3 et les traitements mis en oeuvre (NC01, MV, 4t et 4tMV) sont les mêmes que ceux précédemment étudiés.

La méthode des vases de végétation, souvent utilisée pour le diagnostic des carences en minéraux du sol (LOMBAERT, 1987), est envisagée ici pour apprécier la biodisponibilité des nutriments du sol, c'est-à-dire la mobilisation des réserves du sol et leur prélèvement par la plante.

Le protocole expérimental prévoit la comparaison des traitements appliqués dans un dispositif totalement randomisé, avec quatre répétitions.

Chaque pot tronconique de 914 cm³ est rempli avec 1 kg de sol puis mis à incuber dans l'étuve qui a servi aux autres incubations. Au bout de trois semaines d'incubation, le semis du *Lolium multiflorum* est effectué tel que préconisé par LOMBAERT (1987) : densité de semis de 400 mg de graines pour une surface de 100 cm², soit 613 mg par pot en tenant compte d'un taux de germination évalué

à 70%. Les graines sont réparties le plus régulièrement possible à la surface du sol et recouvertes de 50 cm³ de sable fin lavé aux acides, soit une épaisseur d'environ 3 mm. Les pots sont immédiatement portés dans une serre climatisée où les conditions suivantes sont maintenues :

- température : 27 °C le jour et 20°C la nuit ;
- humidité relative : 90% le jour et 70% la nuit.

Le sol est maintenu à l'humidité équivalente à pF 2,5 par addition d'eau pure (*Milli-Q*) tous les jours, après contrôle par pesée.

5.3.2. METHODES D'ANALYSE

Toutes les analyses sont faites séparément pour chacune des quatre répétitions de l'essai.

L'analyse statistique des résultats procède de l'analyse de variance et la comparaison multiple des moyennes est réalisée avec le test de Newman-Keuls, en utilisant le logiciel STATGRAPHICS (STSC, 1991).

5.3.2.1. Biomasse

Deux coupes sont réalisées aux 28 et 56^{èmes} jours après semis, à l'aide de ciseaux suivant le plan horizontal défini par le bord du pot.

Le poids sec des parties aériennes du *ray grass* est obtenu par séchage à 60 °C dans une étuve ventilée jusqu'à poids constant (3 jours).

A l'issue de la deuxième coupe, l'ensemble est dépoté et le sol est dispersé sous le jet d'un robinet. Les racines sont récupérées sur un tamis à mailles de 2 mm, rincées abondamment à l'eau *Milli-Q* puis mises à sécher dans une étuve ventilée avant de déterminer la biomasse.

5.3.2.2. Analyses chimiques

La composition de la plante en éléments minéraux est déterminée suivant la méthode de référence du Comité Inter-instituts d'étude des techniques analytiques du diagnostic foliaire (C.I.I., 1969). Dans des capsules en porcelaine, des prises de 500 mg de matière végétale finement broyée, séchée 16 heures à 60 °C et refroidie 30 mn au dessiccateur, sont précalciniées sur plaque chauffante à

100-130 °C, puis calcinées à 500 °C pendant 6 heures. L'évaporation à sec sur plaque chauffante sans dépasser 250 °C permet d'insolubiliser la silice (PINTA, 1980).

Les cendres blanches sont reprises par 2 mL d'acide chlorhydrique au demi (6 mol L⁻¹) et la solution est filtrée sur *Whatman n°42* puis recueillie dans une fiole jaugée de 25 mL. Après refroidissement, le volume est ajusté avec de l'eau désionisée. Les cations mis en solution sont dosés par spectrométrie d'absorption atomique en flamme.

5.3.3. RESULTATS

Les résultats portent sur la biomasse produite, la composition chimique et, partant, les prélèvements par la plante.

5.3.3.1. Biomasse produite

Le nombre moyen de pieds par pot diffère peu d'un traitement à l'autre (tableau 5.3-1). Par conséquent, les différences observés sur les autres paramètres étudiés peuvent être attribués, toutes choses égales par ailleurs, aux traitements appliqués au sol, d'autant plus qu'aucune attaque parasitaire n'a été notée sur la culture.

Tableau 5.3-1 : Poids secs (en grammes) des parties aériennes et des racines du *Lolium multiflorum* obtenus en fonction du traitement reçu par le sol de la Vallée du Niari.

Trait.		NPP	1 ^{ère} coupe	2 ^e coupe	racines
NC01		161,5 ^a	0,92 ^a	0,24 ^a	0,44 ^b
	σ	12,4	0,06	0,03	0,10
MV		160,8 ^a	1,40 ^b	0,33 ^{ab}	0,41 ^{ab}
	σ	12,5	0,20	0,06	0,02
4t		163,5 ^a	1,01 ^a	0,38 ^b	0,37 ^{ab}
	σ	4,4	0,06	0,06	0,02
4tMV		154,5 ^a	1,65 ^c	0,60 ^c	0,36 ^{ab}
	σ	7,9	0,08	0,08	0,09

NPP = Nombre moyen de pieds par pot. Pour chacun des trois paramètres du tableau (colonnes), les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas différentes au seuil de 5% selon le test de Newman-Keuls. σ est l'écart-type de la moyenne.

L'apport de 4000 kg ha⁻¹ de calcaire broyé n'a pas d'effet significatif sur la biomasse produite à la première coupe. Celle-ci est par contre fortement augmentée par l'enfouissement de *Pueraria* et la forte synergie des effets de ces deux types d'apport se traduit par des poids secs atteignant 1,8 la valeur du témoin, comme le montre le tableau 5.3-1.

D'une manière générale, on note une nette diminution des poids secs à la deuxième coupe, qui sont 3 à 4 fois plus faibles qu'à la première coupe. L'effet du *Pueraria* s'estompe mais l'apport de calcaire augmente significativement le poids sec.

La colonisation du volume de sol par les racines est sensiblement la même pour tous les traitements et les poids secs sont peu différents d'un traitement à l'autre.

5.3.3.2. Composition minérale de la plante

Le tableau 5.3-2 présente la composition minérale de la plante pour les deux coupes et les racines.

Le contenu minéral des racines n'est pas significativement différent suivant les traitements, ce qui laisse à penser que les racines transfèrent bien vers les parties aériennes les éléments puisés dans le sol. C'est donc dans les parties aériennes que doivent s'observer les répercussions des traitements mis en oeuvre.

L'apport de calcaire augmente les teneurs en calcium des parties aériennes aussi bien à la première qu'à la deuxième coupe. A l'inverse, l'enfouissement de *Pueraria* diminue ces teneurs, mais l'effet n'est vraiment significatif que sur la première coupe.

Le sens de variation des teneurs en magnésium est le même que celui du calcium, mais concernant l'apport de calcaire, l'augmentation n'est sensible qu'à la deuxième coupe.

Les teneurs en potassium des parties aériennes sont, pour les deux coupes, nettement augmentées par l'enfouissement de *Pueraria*, l'apport de calcaire n'ayant pas d'effet. Cette augmentation est liée aux baisses des teneurs en Ca et Mg observées sur les plantes poussant sur le sol ayant reçu du *Pueraria*.

Tableau 5.3-2 : Influence de l'apport de calcaire broyé de Madingou et/ou de *Pueraria* sur la composition en minéraux du *Lolium multiflorum*.

Traitements		Composition en éléments minéraux (g kg ⁻¹ MS)					
		Ca	Mg	K	Na	Al	Mn
1 è r e	NC01	10,14 _{cd}	3,35 _{cd}	24,84 _b	0,25 _a	0,12 _{ab}	0,21 _{cd}
	σ	0,18	0,04	1,11	0,05	0,03	0,03
	MV	6,83 _b	2,63 _b	42,09 _d	0,30 _a	0,11 _{ab}	0,15 _{abc}
	σ	1,10	0,70	7,50	0,07	0,01	0,02
c o u p e	4t	17,81 _{ef}	3,71 _d	21,19 _b	0,25 _a	0,08 _a	0,12 _{ab}
	σ	1,65	0,20	2,51	0,04	0,03	0,01
	4tMV	12,04 _d	3,11 _c	33,30 _c	0,24 _a	0,09 _a	0,07 _a
	σ	2,41	0,33	5,56	0,14	0,03	0,01
2 è m e	NC01	10,08 _{cd}	4,75 _e	26,48 _b	1,91 _c	0,52 _e	0,30 _f
	σ	1,51	0,26	0,67	0,28	0,11	0,03
	MV	8,11 _{bc}	4,72 _e	37,52 _c	1,25 _b	0,39 _{de}	0,26 _{de}
	σ	1,44	0,38	3,11	0,23	0,06	0,04
c o u p e	4t	19,16 _f	5,66 _f	22,42 _b	1,13 _b	0,36 _{cde}	0,16 _{bc}
	σ	1,50	0,39	0,99	0,30	0,06	0,09
	4tMV	16,35 _e	5,15 _e	26,38 _b	0,81 _b	0,41 _{de}	0,13 _{ab}
	σ	1,99	0,30	1,85	0,09	0,04	0,02
r a c i n e s	NC01	1,58 _a	0,35 _a	1,19 _a	1,19 _b	0,23 _{abcd}	0,12 _{ab}
	σ	0,40	0,01	0,18	0,22	0,08	0,02
	MV	1,39 _a	0,34 _a	1,44 _a	1,12 _b	0,26 _{abcd}	0,12 _{ab}
	σ	0,07	0,02	0,48	0,32	0,14	0,01
	4t	2,33 _a	0,44 _a	1,48 _a	1,13 _b	0,29 _{bcd}	0,13 _{ab}
	σ	0,31	0,04	0,69	0,26	0,21	0,08
	4tMV	2,02 _a	0,51 _a	1,18 _a	0,81 _b	0,19 _{abc}	0,12 _{ab}
	σ	0,21	0,04	0,21	0,14	0,02	0,02

Pour chaque colonne du tableau (élément), les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas différentes au seuil de 5% selon le test de Newman-Keuls.

σ indique l'écart-type de la moyenne.

La teneur en sodium, qui atteint en moyenne de 0,3 g kg⁻¹ MS à la première coupe et atteinnt 0,8 à 1,9 g kg⁻¹ MS à la seconde coupe, reste peu

marquée par les traitements reçus par le sol.

Les teneurs en aluminium relevées ici ne sont pas indicatrices de toxicité (selon MENGEL et KIRKBY (1982), des teneurs de 200 ppm sont courantes dans les tissus des végétaux supérieurs). Ces teneurs en aluminium décroissent légèrement, mais de façon peu significative, avec les apports de calcaire ou l'enfouissement de *Pueraria*.

Les teneurs des plantes en manganèse diminuent plus nettement en cas d'apport, l'effet du calcaire étant plus marqué que celui du *Pueraria*.

5.3.3.3. Exportations des éléments minéraux par la plante

Les exportations de calcium par la plante à la première coupe sont augmentées par l'apport de calcaire broyé (1,7 fois les quantités prélevées dans le sol témoin). Cette augmentation est plus importante avec l'apport combiné calcaire-*Pueraria* (deux fois les quantités prélevées dans le sol témoin), en dépit d'un effet nul de l'enfouissement de *Pueraria* seul. A la deuxième coupe les prélèvements par la plante sont nettement plus forts que dans le sol témoin et sont multipliés par 3 ou 4 par l'apport de calcaire seul ou l'apport combiné calcaire-*Pueraria*.

Concernant le magnésium, à la première coupe, seule la combinaison calcaire-*Pueraria* augmente significativement les exportations qui représentent alors 1,7 fois celles réalisées dans le sol témoin. A la seconde coupe, l'apport de calcaire double les prélèvements de magnésium par la plante et la combinaison des deux apports les triple presque.

Le potassium, quant à lui est significativement plus exporté dans les traitements avec apports de *Pueraria* (2,4 à 2,6 fois les prélèvements opérés dans le sol témoin). On note un effet dépressif du calcaire sur les prélèvements de potassium, phénomène qui est à relier à la forte rétention du potassium en présence de calcaire broyé.

Les prélèvements de sodium et d'aluminium sont quasi indifférents aux traitements reçus par le sol, tandis que les prélèvements de manganèse par la plante sont réduits de moitié lorsque le calcaire est apporté au sol lors de la première coupe et ne varient pas à la seconde coupe.

Tableau 5.3-3 : Influence de l'apport de calcaire broyé de Madingou et/ou de *Pueraria* sur les exportations des éléments minéraux par le *Lolium multiflorum*.

Traitements		Quantités exportées (cmol(+) kg ⁻¹)					
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺
1 è r e c o u p e	NC01	0,046 _b	0,025 _d	0,058 _d	0,001 _a	0,001 _a	0,0008 _d
	σ	0,002	0,002	0,006	0,000	0,000	0,0001
	MV	0,048 _b	0,030 _d	0,149 _e	0,002 _{ab}	0,002 _a	0,0008 _d
	σ	0,010	0,010	0,027	0,001	0,000	0,0001
	4t	0,079 _c	0,031 _d	0,055 _d	0,001 _a	0,001 _a	0,0004 _{bc}
	σ	0,029	0,003	0,005	0,000	0,000	0,0001
	4tMV	0,099 _d	0,042 _e	0,141 _e	0,002 _{ab}	0,002 _a	0,0004 _{bc}
	σ	0,018	0,004	0,023	0,001	0,001	0,0001
2 è m e c o u p e	NC01	0,012 _a	0,009 _b	0,016 _{ab}	0,002 _{ab}	0,001 _a	0,0003 _{abc}
	σ	0,002	0,001	0,002	0,000	0,000	0,0001
	MV	0,013 _a	0,013 _b	0,032 _{bc}	0,002 _{ab}	0,001 _a	0,0004 _{abc}
	σ	0,002	0,002	0,009	0,000	0,000	0,0001
	4t	0,037 _b	0,018 _c	0,022 _{abc}	0,002 _{ab}	0,002 _a	0,0003 _{abc}
	σ	0,005	0,004	0,004	0,000	0,000	0,0002
	4tMV	0,049 _b	0,025 _d	0,041 _{cd}	0,002 _{ab}	0,002 _{ab}	0,003 _b
	σ	0,006	0,003	0,006	0,000	0,000	0,001
r a c i n e s	NC01	0,004 _a	0,001 _a	0,001 _a	0,002 _{ab}	0,001 _a	0,0002 _a
	σ	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	MV	0,003 _a	0,001 _a	0,002 _a	0,002 _{ab}	0,001 _a	0,0002 _a
	σ	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
	4t	0,004 _a	0,001 _a	0,001 _a	0,001 _{ab}	0,001 _a	0,0002 _a
	σ	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	4tMV	0,002 _a	0,002 _a	0,001 _a	0,001 _{ab}	0,001 _a	0,0002 _a
	σ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Pour chaque colonne du tableau (élément), les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas différentes au seuil de 5% selon le test de Newman-Kuels. σ indique l'écart-type de la moyenne.

Concernant les exportations d'éléments minéraux par la plante, on observe que le rapport Ca/Mg qui est de 1,5 pour le témoin, n'est pas modifié par

l'enfouissement de *Pueraria* mais augmente en cas d'apport de calcaire (2,6 pour le calcaire seul et 2,1 pour l'apport combiné). Le rapport Ca/K qui est de 0,7 pour le témoin, est augmenté par l'apport de calcaire (1,6) et abaissé par l'enfouissement de matière végétale (0,3 pour le *Pueraria* seul et 0,8 pour l'apport combiné).

A l'issue de cette caractérisation des possibilités nutritives du sol sous l'effet des différents traitements mis en oeuvre, il apparaît important de procéder à une évaluation de la cohérence des différentes déterminations ou des tests mis en oeuvre dans cette étude de la dynamique d'échange dans les sols.

5.4. APPRECIATION GENERALE DE LA DYNAMIQUE D'ECHANGE DES ELEMENTS MINERAUX

Quatre tests ont été utilisés pour apprécier les modifications de la dynamique des éléments minéraux dues à l'apport de calcaire broyé de Madingou et à l'enfouissement de *Pueraria* :

- échangeabilité des cations par la méthode au chlorure de cobaltihexammine,
- désorption avec entraînement par gravité, simulant la lixiviation sous pluviométrie locale
- séparation par électrodialyse, (transport électrocinétique),
- absorption par une plante-test, le *Lolium multiflorum L.*

Cette appréciation des résultats concernant la dynamique d'échange est effectuée sur le sol de la Vallée du Niari qui a subi la totalité des quatre tests et l'analyse porte sur les quatre traitements communs à ces tests (témoin, 4800 kg MS ha⁻¹ de *Pueraria*, 4000 kg ha⁻¹ de calcaire et combinaison calcaire-*Pueraria*).

La discussion porte essentiellement sur les résultats obtenus pour les trois éléments majeurs Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺.

Le tableau 5.4-1 rappelle les principaux résultats obtenus avec les différents tests mis en oeuvre.

Tableau 5.4-1 : Cations échangeables (CE), éléments séparés par électrodialyse (ED), prélèvements totaux par la plante (PP) dans le sol du Niari incubé pendant trois semaines.

Elément	Trait.	CE	ED	PP	CP
		cmol(+) kg ⁻¹			g kg ⁻¹
Ca ²⁺	NC01	2,48	2,45	0,06	7,28
	MV	2,71	1,38	0,06	5,44
	4t	6,70	3,86	0,13	13,1
	4tMV	7,28	2,80	0,15	10,14
Mg ²⁺	NC01	0,30	0,28	0,04	2,80
	MV	0,38	0,29	0,04	2,56
	4t	0,41	0,26	0,05	3,27
	4tMV	0,51	0,31	0,07	2,92
K ⁺	NC01	0,06	0,28	0,08	17,50
	MV	0,21	0,41	0,18	27,02
	4t	0,05	0,18	0,08	15,03
	4tMV	0,20	0,26	0,18	20,28

CE = cations échangeables (à la cobaltihexammine)

ED = éléments séparés par électrodialyse après passage d'un courant de 200 C

PP = prélèvement total par la plante (coupes + racines)

CP = composition de la plante.

Il en ressort que les quantités totales prélevées par la plante ne représentent que moins de 2,5% du calcium échangeable et 5,4% du calcium séparé par électrodialyse du sol contenu dans les vases de végétation.

Les quantités de magnésium prélevées par la plante n'atteignent pas 15% du Mg²⁺ échangeable du sol, alors qu'ils représentent jusqu'à 22% de la quantité séparée par électrodialyse.

Les prélèvements du potassium par la plante représentent, en cas d'enfouissement de *Pueraria* au sol, 85 à 90% du K⁺ échangeable du sol et environ 45 à 70% du K⁺ séparé par électrodialyse. Dans le cas contraire (sol témoin ou avec apport de calcaire seul), les prélèvements par la plante se font dans les réserves du sol, au-delà du K⁺ échangeable ; par contre, ces prélèvements représentent respectivement 30% et 45% de la quantité séparée par électrodialyse.

Au total, il apparaît de grands écarts entre l'échangeabilité des éléments, les quantités séparées par électrodialyse et celles absorbées par la

plante.

Il ressort cependant que :

- d'une part, les quantités exportées par la plante sont très étroitement corrélées aux cations échangeables.

- d'autre part, les éléments séparés par électrodialyse sont plutôt mieux corrélés à la composition de la plante, sauf dans le cas du magnésium.

Les coefficients de corrélation sont très élevés ($r = 0,99$) et les fortes valeurs de coefficient de détermination ($r^2 > 97\%$) prouvent que la régression linéaire est un modèle bien adapté à l'étude de ces relations.

L'intérêt de la démarche adoptée, qui consiste à associer différents tests de diagnostic de mobilité et de disponibilité des éléments minéraux, réside en ce que cette démarche conduit à dégager trois notions qui caractérisent les réserves en éléments nutritifs du sol :

- quantité, c'est-à-dire la réserve assimilable participant aux équilibres sol-solution,

- intensité, exprimant la «pression» de l'espèce ionique dans le système sol-solution,

- pouvoir-tampon, notion voisine du pouvoir «adsorbant» (ou fixateur) classique, qui permet d'apprécier le degré de saturation des adsorbants en l'élément considéré et de prévoir les répercussions de l'enrichissement ou de l'appauvrissement sur la teneur de la phase liquide (BLANCHET, 1979).

Dans le cas présent, il ressort deux points essentiels :

1) les cations échangeables déterminées par la cobaltihexammine donnent une idée de la **quantité** d'éléments de la réserve minérale du sol qui est plus ou moins lentement mise à la disposition de la plante,

2) les éléments séparés par électrodialyse, quant à eux, traduisent mieux l'**intensité** de la régulation du passage du pool labile vers la solution du sol, et peuvent correspondre à une certaine disponibilité des éléments pour les plantes.

Ces remarques peuvent être resituées sur le schéma de MENGEL et KIRKBY (1982) comme l'illustre la figure 5.4-1.

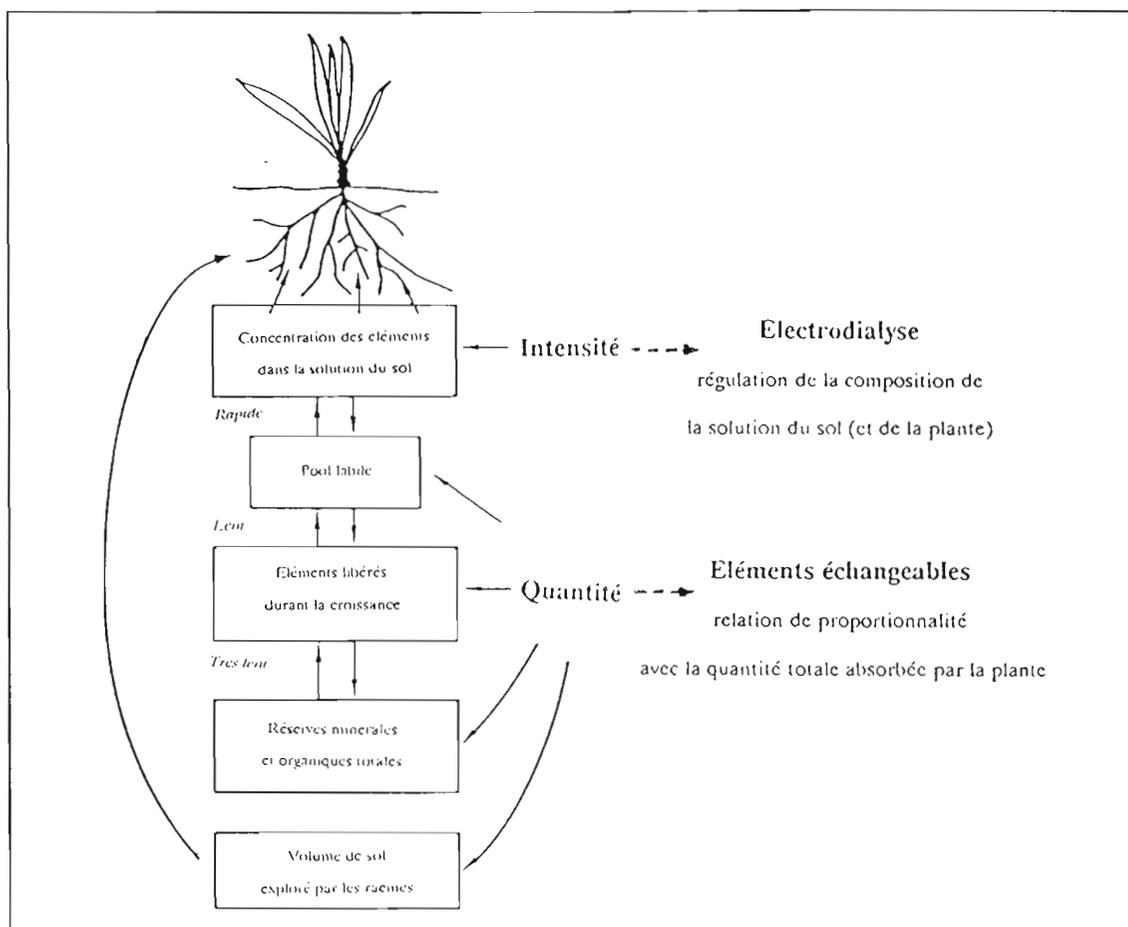


Figure 5.4-1 : Cations échangeables et séparation par électrodialyse, en relation avec les notions de quantité, intensité et absorption par la plante (d'après schéma d'origine de MENGEL et KIRKBY, 1982).

En définitive, il apparaît que ce sont des tests ou déterminations complémentaires qui peuvent être associés dans une démarche globale d'appréciation de la disponibilité des nutriments pour les plantes cultivées.

L'intérêt d'une telle démarche est justifiée par le fait que dans un système sol-plante la biodisponibilité d'un élément en solution peut être le résultat d'une compétition entre les racines, les composés solubles complexés et la phase solide du sol pour la forme ionique libre de cet élément (SPOSITO, 1984).

Ces tests ou déterminations fournissent des indications claires sur le devenir des apports faits au sol et leur influence sur la mobilité ou la disponibilité des éléments minéraux, qui seront reprises dans les recommandations faites pour une meilleure utilisation de ces milieux lors de la mise en culture.

**SYNTHESE DES RESULTATS,
CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET PERSPECTIVES**

«Savoir pour prévoir, et prévoir pour agir» (Auguste COMTE (1842), cité par MEDINA et al, 1993 - La philosophie comme débat entre les textes. Ed. Magnard, p. 394).

Le problème de l'acidité du sol peut être abordé de plusieurs façons, allant des causes d'acidification (naturelles ou induites par l'homme) et des équilibres de protons, à la mesure des propriétés des sols acides déterminant leur comportement (GILLMAN, 1991).

Le présent travail s'est attaché à :

- évaluer la pratique actuelle de la correction de l'acidité des sols cultivés de plateau de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké ;
- analyser leur comportement physico-chimique afin de mieux prévoir leurs réactions face aux variations de pH (acidification ou correction de celle-ci) ;
- suivre, en conditions contrôlées de laboratoire, les effets de l'apport de calcaire broyé et de l'enfouissement de *Pueraria* sur les propriétés du sol, en particulier la réaction et la garniture cationique du complexe d'échange ;
- apprécier, enfin, les modifications induites sur la dynamique d'échange d'ions à l'interface sol/solution.

Pour ce faire, les investigations menées associent une approche de terrain et des expérimentations de laboratoire.

Cette synthèse en résume les principaux résultats et aborde l'intérêt de ce travail tant du point de vue de la méthodologie utilisée, des acquis scientifiques que des applications agronomiques.

6.1. METHODOLOGIE ET PRINCIPAUX ACQUIS DES TRAVAUX REALISES

Les sols de plateau de la Vallée du Niari et ceux du plateau de Mbé-Batéké ont, surtout en raison de leur topographie relativement plane et de leur végétation de savane, suscité un grand intérêt pour la culture mécanisée.

La mise en valeur de ces sols soulève cependant d'énormes problèmes, dus en particulier à la méconnaissance de leur fonctionnement physico-chimique.

Les résultats obtenus contribuent à une meilleure connaissance du fonctionnement physico-chimique de ces sols ; leur rapprochement avec ceux de travaux anciens ou plus récents permet d'en tirer des conséquences sur le plan agronomique.

6.1.1. EVOLUTION DU SOL ET ACIDIFICATION

Le processus principal de formation des sols étudiés est la ferrallitisation : altération par hydrolyse, acidification progressive, déshydratation partielle sont caractéristiques et aboutissent naturellement à la formation de **sols acides** (PEDRO, 1985 ; DUCHAUFOR, 1991). Même si le sol du plateau de Mbé présente un horizon B oxisque peu différencié de la roche-mère (sables ocres ou limons sableux) et pauvre en minéraux altérables, le caractère «ferrallitique» est lié à la présence de kaolinite (SCHWARTZ, 1988).

Les résultats de l'analyse minéralogique (Cf §3.1) révèlent deux tendances pédogénétiques légèrement différentes sur les deux situations étudiées. Dans les sols de la Vallée du Niari c'est la monosiallitisation qui prédomine (genèse de la kaolinite, lixiviation des cations basiques et d'une partie de la silice, accumulation des hydroxydes de fer, de manganèse et de titane), tandis que dans ceux du Plateau Batéké, s'ajoute l'allitisation (avec genèse de la gibbsite). Ce dernier phénomène est sûrement en rapport avec une pluviométrie et une perméabilité du matériau beaucoup plus importante sur le plateau de Mbé-

Batéké.

Les résultats de l'analyse minéralogique, notamment la présence de minéraux lourds (titane), fournissent également des arguments concernant l'autochtonie ou l'allochtonie des matériaux originels de la couverture pédologique de plateau de la Vallée du Niari. Ces minéraux appartiennent à des granites, diorites, gneiss, schistes cristallins, ou certaines roches sédimentaires (sables, grès ...). Selon PLAISANCE et CAILLEUX (1960), le rutile est l'un des minéraux qui résistent le plus longtemps dans les sables et migre le plus loin des régions d'origine, ce qui militerait **en faveur de la thèse de l'allochtonie**.

Ces sols ferrallitiques acides sont bien pourvus en matière organique sous savane naturelle, où la décomposition *in situ* du système racinaire des Poacées (Graminées) assure une activité biologique normale. La structure est bonne, polyédrique dans la Vallée du Niari et microagrégée («fluffy») sur le plateau de Mbé-Batéké.

La perméabilité des sols de plateau de la Vallée du Niari est bonne, malgré leur teneur élevée en éléments fins (50 à 60%) avec une vitesse d'infiltration toujours supérieure à 10 cm h⁻¹, du fait d'une bonne agrégation (MAPANGUI, 1992). Les formations Batéké constituent quant à elles une vaste réserve d'eau qui alimente régulièrement les affluents du fleuve Congo (*Léfini, Mpama, Alima, Nkéni*), le bassin versant de l'*Ogooué* et du *Niari* ; le régime de ces cours d'eau reflète l'influence prépondérante de l'infiltration au détriment du ruissellement (LE MARECHAL, 1966).

En raison de cette nature poreuse des matériaux sous-jacents et des sols, toute dénudation du sol sans précaution entraîne progressivement :

- la diminution du taux de matière organique et de l'activité biologique associée, donc une perte de l'agrégation d'origine biologique,
- la lixiviation des cations alcalins et alcalino-terreux, dont l'importance est en rapport avec l'intensité du drainage,
- la baisse du pH et la solubilisation de l'aluminium,
- la désaturation du complexe d'échange,
- la perte de l'agrégation d'ordre physico-chimique par mobilisation des ciments colloïdaux (destruction ou solubilisation et entraînement des

oxyhydroxydes),

- la réduction du manganèse (passage sous la forme Mn^{2+}) due à la baisse du pH et à la déstructuration qui peut créer des conditions réductrices pour cet élément.

Ce rappel des principaux mécanismes qui prévalent lors de la mise en culture des sols sous savane n'indique pas l'ordre d'intervention des phénomènes.

6.1.2. DEGRADATION DES SOLS SOUS CULTURE ET INTERET DE L'APPROCHE DE TERRAIN

En vue d'évaluer la pratique actuelle de la correction de l'acidité dans les sols cultivés de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké, une première approche a été utilisée sur le terrain. Les schémas de prélèvement des échantillons de sol ont pris en compte la variabilité spatiale due en particulier à l'hétérogénéité des apports de calcaire broyé.

Comparativement aux sols de référence sous savane (chapitre 2), il est apparu une dégradation des propriétés physico-chimiques du sol qui se traduit par :

- une baisse du pH,
- une diminution de la capacité d'échange cationique et de la garniture cationique,
- une diminution de moitié des teneurs en matière organique du sol.

Ces phénomènes de perte de fertilité des sols sous culture rejoignent les observations des différents auteurs ayant travaillé sur ces sols, en particulier ceux de la Vallée du Niari (MARTIN, 1970 ; MAPANGUI, 1992).

Le sol du plateau de Mbé-Batéké a en outre révélé un comportement particulier, avec des valeurs de pH_{KCl} supérieures ou égales à celles du pH_{eau} sous culture. Ce fait peut être expliqué par sa plus forte proportion en oxyhydroxydes par rapport au sol du Niari, eu égard aux taux d'argile granulométrique des deux sols.

L'analyse de la garniture cationique du complexe fait en outre ressortir **des risques de toxicité manganique dans les sols de la Vallée du Niari, tandis que c'est l'aluminium qui est à craindre dans ceux du plateau de Mbé-Batéké.**

Au total, les sols étudiés appartiennent à deux pôles texturaux extrêmes, très argileux pour la Vallée du Niari et très sableux pour le Plateau de Mbé-Batéké, avec des réserves minérales plus faibles dans le second sol.

Les facteurs pédogénétiques se traduisent par un **pH bas dans l'ensemble du profil** de sol et de **faibles taux de saturation** du complexe adsorbant en cations alcalins et alcalino-terreux.

Le constat de l'acidité des sols et de son aggravation sous culture a donc bien été fait sur le terrain ; cependant l'hétérogénéité des apports de calcaire réalisés au champ, rendant difficile la compréhension des mécanismes, nécessite et justifie le recours à des études de laboratoire.

6.1.3. APPORTS DE LA CARACTERISATION DU COMPLEXE D'ECHANGE

6.1.3.1. Minéralogie

L'analyse minéralogique a permis d'identifier la kaolinite désordonnée, la goéthite alumineuse, le rutile et le quartz comme constituants minéraux communs aux deux sols.

Les deux sols diffèrent par la présence d'interstratifiés 2:1 et d'oxyde de manganèse dans le Niari, et de gibbsite sur le plateau de Mbé-Batéké.

6.1.3.2. Propriétés d'échange d'ions

Les propriétés de charge des sols du Congo avaient été très peu étudiées. L'utilisation complémentaire des **méthodes potentiométriques et d'adsorption ionique en fonction du pH** a permis de mieux caractériser le complexe adsorbant des sols considérés.

Des différences existent certes, mais les caractéristiques essentielles convergent toutes : il s'agit de systèmes hybrides, **mélanges de composés à charges permanentes et variables**.

La diminution de l'accroissement moyen de la «charge variable nette»

du sol ($\Delta\sigma$) entre pH 4,5 et 6,0 sous culture confirme la modification des propriétés physico-chimiques du sol par suite de la mise en culture. Cette modification affecte surtout les horizons superficiels et le rôle important joué par la matière organique dans le comportement du complexe d'échange est également confirmé.

L'existence d'un point de charge nulle (pH_0) toujours plus bas que le pH du sol au moment considéré (PTN) indique une **tendance naturelle de ces sols à s'acidifier**.

La prise en compte du paramètre $|pH_0 - PTN|$ montre l'**intérêt de maintenir ou de remonter le pH à des valeurs «correctes» permettant au sol d'avoir une charge variable négative prédominante**.

L'analyse de l'évolution des CEC en fonction du pH montre la faiblesse des capacités d'échange cationique qui sont cependant deux à trois fois plus élevées dans le Niari que sur le plateau de Mbé. Les différences très nettes entre les horizons étudiés font ressortir les effets de la texture et de la teneur en matière organique du sol. Il apparaît nécessaire, pour à la fois minimiser la solubilisation de l'aluminium et atteindre le pallier de CEC maximale, que le pH (dans $CaCl_2$ 0,002 M) soit respectivement supérieur à 5,1 et 5,8 pour les horizons de surface des sols du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Ces valeurs dépassent celles du PTN, respectivement 4,5 et 4,9, ce qui montre également bien la **nécessité de corriger l'acidité du sol**.

Cette analyse révèle en outre que l'aluminium est solubilisé jusqu'à pH 6-6,5 dans le sol du plateau de Mbé-Batéké, tandis qu'il ne l'est qu'en deçà de pH 5 dans celui de la Vallée du Niari. Ce résultat confirme l'**existence d'un risque de toxicité aluminique dans les sols du plateau de Mbé-Batéké, risque d'autant plus important que l'ion Al^{3+} domine le complexe, avec l'ion calcium**.

La capacité d'échange anionique (charge positive) est pratiquement nulle au pH du sol dans les horizons humifères de surface où elle semble bloquée par les anions organiques. Il en résulte des risques non négligeables de pertes de nitrates par lixiviation. Des charges positives (rétention des anions) se manifestent uniquement aux pH très bas et de façon plus importante dans les sols du plateau de Mbé-Batéké que dans ceux du Niari ; cela peut éventuellement compenser la lixiviation, surtout pour les plantes dont l'enracinement est relativement profond.

Cette caractérisation permet de *mieux prévoir les opérations à mener dans le cadre de la gestion de ces sols à charges variables et permanentes qui nécessitent une gestion particulière* (UEHARA et GILLMAN, 1981 ; GILLMAN, 1991) :

- **remontée du pH** par l'apport d'amendement calcaire,
- **abaissement du pH_0** par l'apport de matière organique et/ou de phosphates. En effet, selon TAN (1993), l'humus peut commencer à avoir une CEC à pH très bas (de l'ordre de 3) et celle-ci augmente avec le pH. De plus, des ions comme HPO_4^{2-} et F^- sont capables de déplacer des groupes de surface par échange de ligands et ce faisant, augmenter la charge négative des surfaces RITCHIE (1989).

Aussi est-il apparu nécessaire d'étudier les réponses effectives du sol à l'apport de produits utilisés dans la correction de l'acidité.

6.1.4. CORRECTION DE L'ACIDITE ET DYNAMIQUE D'ECHANGE D'IONS

6.1.4.1. Effets de l'apport de calcaire et/ou l'incorporation de *Pueraria javanica* sur le complexe d'échange

Bien que l'on connaissait déjà l'importance de l'apport de calcaire (MARTIN, 1961 et 1970), de la couverture du sol (JULIA, 1953) et de la matière organique qui joue un rôle primordial dans la rétention en eau (BRAUDEAU, 1984), il a paru intéressant de suivre le devenir du *Pueraria* de la jachère enfouie lors de la mise en culture en présence ou non de calcaire broyé.

Les doses requises d'amendement ont été déterminées **sur la base du pouvoir tampon**, qui tient compte des caractéristiques intrinsèques du sol, en particulier du complexe d'échange à charges variables et permanentes.

Les doses ainsi déterminées ont été validées en confrontant les valeurs de pH attendues avec celles réellement obtenues par incubation du sol avec des doses croissantes de calcaire broyé. Les prévisions concordent bien avec les valeurs de pH effectivement obtenues sur le sol, en particulier pour les valeurs du pH_{eau}

inférieures de 6. La CEC et les cations échangeables du sol ayant reçu du calcaire broyé ont été étudiées par la **méthode au chlorure de cobaltihexammine**.

Dans les conditions expérimentales de cette étude, il a été noté que les teneurs en carbone organique n'ont pas été modifiées au bout des 12 semaines d'incubation ; les modifications de la réaction du sol et de son complexe d'échange sont bien **attribuables aux effets des doses de calcaire broyé et/ou de l'enfouissement de matière végétale**.

Les résultats obtenus font apparaître une rapidité d'action du calcaire broyé de Madingou qui se manifeste après seulement deux heures de contact et se maintient au cours de l'incubation. L'apport de 2000 kg ha⁻¹ relève le pH de 4,6 à 5,4 dans le sol du Niari et de 4,6 à 5,2 dans celui du plateau de Mbé. Avec la dose de 4000 kg ha⁻¹ le pH atteint respectivement 6,2 et 6,8.

La CEC qui est de 4 cmol(+) kg⁻¹ dans le sol témoin, croît jusqu'à 5,5 et 8,4 avec des apports respectifs de 2000 et 4000 kg ha⁻¹ dans le sol du Niari. Dans celui de Mbé, la CEC passe de 1 cmol(+) ha⁻¹ dans le témoin, à respectivement 2,2 et 3,6 cmol(+) ha⁻¹ pour les deux doses de calcaire.

Ces valeurs de pH et de CEC ne sont point significativement modifiées par l'enfouissement de *Pueraria* dont l'influence n'est manifeste que sur la garniture cationique du complexe.

Une «stabilisation» des caractéristiques du complexe a autorisé par la suite l'étude de la dynamique d'échange après trois semaines d'incubation.

6.1.4.2. Pertes des éléments par lixiviation

Ce volet de l'étude fait suite à celle de NZILA (1986) dans la série de travaux évaluant les pertes en éléments consécutifs à des apports combinés de calcaire et de matière végétale en conditions contrôlées, non assujetties aux aléas naturels.

D'une façon générale, à l'exception du potassium, les pertes par lixiviation sont plus élevées dans la Vallée du Niari que sur le Plateau de Mbé. Elles sont donc en rapport avec, d'une part l'importance des réserves du sol et d'autre part, les traitements réalisés.

Les pertes en cations dans les sols étudiés ne sont pas à négliger (tableaux 5.1-1 et 5.1-2). Elles sont du même ordre que celles déjà rapportées par différents auteurs (MARTIN, 1970 ; DABIN, 1985) pour les sols du Niari : 250 kg CaO ha⁻¹ an⁻¹, soit 0,74 cmol(+) kg⁻¹ de sol.

Les pertes en potassium, sont deux fois moins importantes dans la Vallée du Niari que sur le Plateau de Mbé où plus de la moitié du potassium apporté est perdu par lixiviation. Ce phénomène peut être expliqué par le faible taux d'argile de ce dernier sol. Cette lixiviation du potassium est nettement limitée par l'apport de calcaire.

La dynamique de l'aluminium peut être mise en relation avec la minéralogie des deux sols (Cf §3.1). L'absence d'aluminium dans les percolats du sol de Mbé-Batéké, peut s'expliquer par le fait que cet élément y est présent sous une forme bien cristallisée, la gibbsite; il ne participerait donc pas aux réactions de dissolution aux conditions de pH et de concentration ionique qui prévalent pendant l'expérimentation. Par contre, selon BRADY (1990) et ULRICH (1991), l'aluminium lié aux oxyhydroxydes de fer peut être en partie perdu par lixiviation lors des premiers drainages qui suivent la réhumectation du sol, mais il participe bien vite aux réactions de solubilisation et d'échange dans les sols, sûrement en jouant son rôle de tampon (Cf §1.1). C'est le cas du sol de la Vallée du Niari, à goethite alumineuse (Cf §3.1), où l'aluminium est recueilli dans les deux premiers percolats.

Le phosphore n'existe point dans les lixiviats de sol. On peut même supposer que cet élément est peu disponible dans ces sols en raison de leur composition minéralogique, et notamment de la présence d'oxydes de fer et d'aluminium (Cf §3.1). En effet, la réactivité des surfaces de ces oxydes est responsable d'un pouvoir fixateur élevé pour le phosphore (JUO et FOX, 1977).

Les pertes en nitrates, surtout influencées par l'enfouissement de *Pueraria*, sont en relation avec la décomposition de la matière végétale. Ceci est surtout vrai dans le sol de la Vallée du Niari où les pertes du témoin ($0,4 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) sont sensiblement augmentées par les deux doses de calcaire mélangées au *Pueraria* (jusqu'à 60% les pertes du témoin).

Dans les sols de la Vallée du Niari, contrairement aux autres cations et malgré sa présence en quantité importante, le manganèse n'est pas du tout perdu par lixiviation. Il reste donc dans l'horizon superficiel où il peut alors devenir disponible pour les plantes en quantités si importantes que sa toxicité pourrait se manifester par suite d'un déséquilibre entre éléments nutritifs.

En outre, l'excès de manganèse inhibe le prélèvement du calcium et du magnésium (MARSCHNER, 1986). Or cet excès de manganèse n'apparaît que

lorsque les conditions d'oxydoréduction sont perturbées par une mauvaise aération (HORST, 1988). On comprend la concomitance entre toxicité manganique sur arachide, décalcification et phénomènes de dégradation physique des terres au Niari observée par plusieurs auteurs (OLLAGNIER et PREVOT, 1955 ; PREVOT et al, 1955 ; MARTIN, 1959, 1963 et 1970).

Cette partie de l'étude permet de mieux connaître le devenir des éléments apportés au sol soit par le calcaire broyé, soit par l'enfouissement de *Pueraria*.

6.1.4.3. Devenir des éléments apportés par les amendements

L'amendement calcaire apporte au sol essentiellement du calcium et du magnésium.

Le calcium apporté est peu lixivié (6% au maximum) et alimente surtout le pool échangeable. La fraction qui devient échangeable est cependant plus forte dans le sol du Niari que dans celui de Mbé-Batéké, en raison sans doute de caractéristiques différentes du complexe d'échange de ces deux sols (liées en particulier à la différence de texture). Le magnésium apporté par le calcaire est proportionnellement plus lixivié que le calcium. Pour les deux sols, l'augmentation de la dose de calcaire de 2000 à 4000 kg ha⁻¹ ne contribue qu'à accroître la fraction immobilisée.

L'enfouissement de *Pueraria* apporte, outre le calcium et le magnésium, du potassium. Le calcium ainsi apporté est essentiellement dans le pool immobilisé (80%). Le magnésium est fortement échangeable (50 à 60% de l'apport). Quant au potassium, très mobile, il est surtout échangeable dans le sol du Niari et lixiviable dans celui de Mbé-Batéké.

L'apport combiné de calcaire et de matière végétale augmente sensiblement la fraction lixiviable du calcium dans le sol de la Vallée du Niari (≈ 10%) mais pas dans celui de Mbé-Batéké. L'effet est moins net concernant le magnésium et la lixiviation du potassium est légèrement diminuée par cet apport simultané.

La dynamique sensiblement différente du calcium et du magnésium

apportés par le calcaire broyé de Madingou tend, aux fortes doses, surtout à accroître le rapport Ca/Mg dans le pool échangeable et disponible du sol. Dans le cas du sol du Niari, ce rapport déjà fortement déséquilibré dans le sol témoin est encore accru par l'apport de calcaire. D'où un effet nul de cet apport de calcaire au niveau de la production végétale (biomasse de la plante test), malgré une remontée conséquente du pH.

Dans le cas du sol du Niari, l'enfouissement de *Pueraria* se traduit par une nette augmentation du potassium disponible et, simultanément, par une diminution de la disponibilité du calcium ; il s'en suit une diminution du rapport Ca/K et aussi Ca/Mg utilisables par les plantes, qui se répercute sur leur composition et se traduit, bien que l'on ne note aucune élévation sensible du pH, par une augmentation nette de la production végétale.

L'effet du *Pueraria* apparaît plus rapide et moins durable que celui de l'apport de calcaire.

L'amélioration de la biomasse du *ray grass* par l'enfouissement de *Pueraria* seul, sans augmentation notable du pH, semble indiquer que **le problème de l'alimentation minérale des plantes semble plus relever d'un déséquilibre nutritionnel que de problèmes spécifiquement liés à l'acidité du sol.**

En substance, les sols étudiés, **naturellement acides, présentent en outre une tendance naturelle à s'acidifier** ; mais cette tendance explique-t-elle tous les phénomènes de dégradation des sols observés sous culture mécanisée ?

Dans la Vallée du Niari, les résultats obtenus par comparaison savane/culture montrent bien une dégradation des caractères physico-chimiques du sol à laquelle peuvent être attribuées les baisses des rendements des cultures. Sur le même site de Mantsoumba, MAPANGUI (1992) attribue cette baisse de productivité à la dégradation physique des horizons de surface du sol. En effet, l'organisation du sol est modifiée à toutes les échelles, jusqu'au niveau microstructural (argile) avec disparition de la fragmentation et de la

microagrégation caractéristiques des sols ferrallitiques. L'évolution de la structure des sols du Niari se traduit, au cours de la dessiccation, par deux mécanismes quasi-simultanés, une fissuration non monotone et une reprise en masse (MAPANGUI, 1992).

La fissuration importante est favorable à la structuration tandis que la prise en masse augmente la cohésion et diminue la continuité de l'espace poral, ce qui affecte les échanges gazeux, la circulation de l'eau et la pénétration des racines ; la nutrition minérale peut alors être perturbée (BLANCHET *et al*, 1974 ; CALLOT *et al*, 1982).

Il est donc difficile de **mettre en évidence l'antériorité des phénomènes physiques et chimiques dans la dégradation du sol**, ou de distinguer leurs parts respectives dans les baisses de rendements des cultures.

6.2. CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET PERSPECTIVES

6.2.1. CONSEQUENCES AGRONOMIQUES

Les résultats obtenus dans la présente étude permettent de revenir sur les esquisses faites par ailleurs dans la synthèse des «Quinze ans de travaux et de recherche dans les pays du Niari» en les reprecisant. Les phénomènes de dégradation physique, chimique et biologique apparaissent concomitants ou indissociables : c'est donc au niveau du système cultural que doivent être recherchées les solutions et **les remèdes doivent porter sur une gestion globale des sols.**

A côté des recommandations sur le travail du sol, la présente étude insiste en particulier sur la nécessité absolue de gérer l'acidité du sol par l'apport des amendements calcaires faiblement magnésiens qui peuvent être produits sur place.

Le travail du sol, pour être respectueux de la structure, doit nécessairement se faire en sol ressuyé (fin de deuxième cycle par exemple) et de préférence avec des charrues à socs et des outils à dents plutôt qu'avec des disques (MAPANGUI, 1992). L'utilisation du pulvériseur lourd à disques crénelés de type «rome-plow» qui travaille sans retourner le sol, déjà utilisé au Niari (MARTIN, 1970) a été préconisée par RAUNET (1982). D'une manière générale, il faut limiter le nombre de passages d'engins agricoles aussi bien pour les sols de la Vallée du Niari que pour ceux du plateau de Mbé-Batéké où un travail minimal est même recommandable.

Afin de ne pas retomber dans les erreurs du passé, l'amendement

calcaire doit être préconisé dès l'ouverture des terres, avant même que ne soient notés les premiers symptômes d'une acidification que l'on sait inéluctable.

La conduite ne doit pas être «standard», mais les apports d'amendements et de fertilisants doivent être raisonnés en fonction du sol (passé cultural, position dans le paysage...) et des exigences de la culture. C'est donc un mode de gestion à la parcelle, avec «fiche d'identité» de chaque parcelle qui est proposé ici, pour un suivi de toutes les opérations réalisées. Des tests adaptés, utilisant la méthode du pouvoir-tampon (Cf §3.2), permettent de calculer les apports nécessaires pour rester dans les limites de pH convenables pour le sol et la plante cultivée (Cf §1.1).

Pour la gestion de l'état calcique du sol (maximum d'enrichissement en Ca^{2+} échangeable, pertes minimales en calcium, fraction immobile minimum), l'apport de 2000 kg ha^{-1} de calcaire broyé est à conseiller à titre indicatif. Les apports peuvent éventuellement être fractionnés si les cycles de culture le permettent et si l'état de la végétation autorise les passages dans la parcelle cultivée. L'incorporation de *Pueraria* seul est à déconseiller car elle réduit la fraction du calcium disponible et exacerbe les pertes en cations majeurs.

Par ailleurs, les apports «localisés» de calcaire sont à déconseiller vivement au profit des épandages uniformes, pour plusieurs raisons. L'environnement favorable créé le long de la ligne d'épandage peut induire soit un faible développement des racines, la plante trouvant tous les éléments dans ce proche environnement, soit une extension des racines le long de cette ligne. Le mauvais ancrage de la plante peut ainsi être responsable d'une résistance amoindrie à la verse. Cette mauvaise colonisation du sol par les racines rend difficile l'exploitation de la réserve en eau, exposant ainsi la plante à des déficits hydriques, surtout lors des périodes sèches. Dans le cas particulier du manioc, les profils culturaux montrent bien que les racines, aussi bien nourricières que tubérisées, débordent largement dans l'interligne où elles peuvent atteindre un mètre en extension latérale. Elles prélèvent donc nécessairement des éléments minéraux dans un milieu non amélioré.

En outre, cette notion d'«apport localisé» est ambiguë : que cette localisation se fasse en rond autour des pieds ou sur la ligne, le problème de la détermination de la superficie couverte, et partant, du calcul de la quantité à apporter pour une dose donnée est délicat.

Les apports de calcaire broyé peuvent faire apparaître des carences en d'autres éléments, comme le potassium, par rééquilibrage des rapports : des

précautions sont donc à prendre en matière de fumure de redressement et des expérimentations d'accompagnement doivent dans tous les cas être prévues.

En raison des pertes par lixiviation non négligeables, le maintien d'une bonne couverture du sol est impératif, surtout en deuxième cycle, lorsque les pluies sont les plus agressives. Il faut une plante qui présente à la fois un système aérien assurant une bonne interception des gouttes de pluies et réduisant la percolation, tout en ayant un système racinaire occupant profondément et densément le sol dans sa masse. Ainsi seront assurés une régénération progressive du stock de matière organique et une remontée des éléments minéraux vers la surface grâce à l'évapotranspiration.

Les engrais verts ont eu au Niari un effet fugace et présenteraient l'inconvénient d'être acidifiants (MAUMON et GRIVEAU, 1968 ; MARTIN, 1970) ; la régénération sous végétation naturelle de sols amenés à un état quasi-minéral par 2 à 3 ans de cultures abusives sur des parcelles de la CGOT à Loudima est faible ou nulle au bout de 10 ans d'observations (MARTIN, 1970). Cela justifie la nécessité de la pratique des jachères cultivées, avec éventuellement un apport de calcaire broyé au moment de la mise en place.

Pour cela, le *Stylosanthes gracilis*, Légumineuse pérenne s'est avérée la meilleure des plantes testées au Niari (MARTIN, 1970). Il y a ainsi une possibilité de «redécouvrir» les vertus d'une jachère pâturée, et notamment d'associer les spéculations animales (source de fumier) et les productions végétales. Des problèmes de gestion des semences ont cependant provoqué un envahissement par le *Mimosa pudica*, véritable peste des pâturages.

Sur le site de Mantsoumba, le *Pueraria javanica* est utilisé comme plante de couverture ou de jachère, dans une rotation de deux ans avec le manioc. Au champ, le *Pueraria*, Légumineuse à tiges très lianescentes et à feuilles trilobées de 7 à 15 cm de long, nodule bien dans le sol du Niari ; il «emmagasine» beaucoup d'eau, ce qui lui permet de conserver le sol humide longtemps après la fin des pluies et de végéter ainsi pendant la saison sèche. Ce serait la plante de couverture idéale s'il ne présentait pas l'inconvénient majeur d'avoir des graines dormantes

dont la germination, échelonnée dans le temps, entraîne parfois l'anéantissement de toute une culture de manioc (photo 6).

Le *Mucuna pruriens* var. *utilis*, proche du *Pueraria*, mais à graines beaucoup plus grosses et maniables (2 cm de long et 1 cm de large) peut constituer une alternative.

Ces Légumineuses à croissance rapide, couvrant bien le sol, permettent de lutter contre les mauvaises herbes, de conserver le sol humide longtemps après la fin des pluies et de maintenir une bonne activité biologique (§2.2).

Grâce à leur enracinement profond, elles permettent de remonter les éléments minéraux des horizons profonds et enrichissent le sol en matière organique par décomposition des racines, des nodosités et d'un important tapis de feuilles mortes. L'établissement d'une symbiose fixatrice d'azote atmosphérique avec les *Rhizobium* au sein des nodosités contribue efficacement à l'enrichissement du sol.

De plus, une amélioration ou une restauration de l'agrégation du sol par le *Pueraria* est notée en une seule année sur le sol de plateau de Mantsoumba (DE BLIC, 1989). Outre sa tolérance à l'acidité du sol, le *Mucuna* permet le contrôle des mauvaises herbes comme *Imperata cylindrica* (HAIRIAH et al, 1993).

Des essais doivent cependant être menés dans chaque cas, afin d'adapter les modes de gestion de cette couverture (pâturée ou non, brûlée ou enfouie, en intercalaire ou non ...) aux conditions agro-écologiques et socio-économiques de la culture à pratiquer.

En définitive, il est intéressant de constater que les observations réalisées au champ puis dans les différents tests mis en oeuvre au laboratoire concordent et s'expliquent mutuellement. Cela justifie *a posteriori*, l'intérêt de la démarche suivie qui se positionne, comme pour DELVAUX (1988) à l'interface entre la pédologie et l'agronomie.

6.2.2. PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Une tentative d'évaluation de la **contribution de la matière organique**

sur les charges variables a été faite avant et après destruction de celle-ci par attaque à l'eau oxygénée stabilisée au stannate de plomb ou comme de BOISSEZON (1970) par calcination au four à moufle à 350 °C pendant 6 heures. En raison des limites des deux méthodes utilisées, des conclusions définitives n'ont pu être tirées. La question mérite d'être approfondie, par exemple, à partir d'échantillons de profondeur **graduellement enrichis en matière organique**. Tout comme des méthodes de dissolution sélective pourront être utilisées pour apprécier les effets des oxydes de fer et d'aluminium sur l'expression des dites charges.

Pour être plus proche de la réalité, il est conseillé de mesurer le pH d'un sol dans une solution aussi proche que possible de celle rencontrée dans le sol par les racines des plantes (SCHOFIELD et TAYLOR, 1955 ; BOLT et BRUGGENWERT, 1978 ; DOLLING et RITCHIE, 1985 ; HELIAR et PORTER, 1989 ; RITCHIE, 1989). Un compromis peut être cependant trouvé en utilisant une solution d'une force ionique moyenne pour un groupe de sol. D'où la **nécessité de déterminer la force ionique des solutions des grands groupes de sols du Congo**.

Les résultats obtenus sur les échanges (chapitre 2) l'ont été en considérant la concentration des ions simples en solution ; or on sait que des paires d'ions tels que CaCl^+ sont souvent adsorbées (SPOSITO, 1984), ce qui risque d'entacher d'erreur les mesures effectuées. Pour pallier cet inconvénient, il est souhaitable dans les travaux futurs d'utiliser des solutions de chlorates à la place des chlorures comme l'ont fait FALLAVIER et OLIVIN (1988).

L'efficacité de l'amendement dépendant de sa finesse et la composition chimique du calcaire broyé de Madingou ne variant pas en fonction de sa granulométrie (Cf §4.4), il est souhaitable que des études soient poursuivies sur **la réactivité et la durée d'action de ce calcaire broyé en fonction de la taille des particules**. Ce travail, qui reste à faire, peut être abordé avec l'utilisation de procédures associant le titrage avec $\text{HCl } 0,5 \text{ N}$ d'une suspension agitée en atmosphère d'azote à pH 3 ou 5 (HARTWIG et LOEPPERT, 1992) à des incubations et des dispositifs au champ (SINGH et SINGH, 1985).

Dans les deux sols le complément apporté par le passage de la dose de 2000 à 4000 kg ha⁻¹ reste totalement immobilisé. La dose de 2000 kg ha⁻¹ peut ainsi être considérée comme une base pour la correction de l'acidité de la couche supérieure (0-10 cm) travaillée du sol. Cependant, l'action du calcaire se manifestant au champ que dans l'horizon où il a été apporté (Cf §2.3.), cette dose peut être modulée pour la **correction de l'acidité des horizons sous-jacents du sol**. Des recherches doivent donc être poursuivies dans ce domaine en comparant éventuellement le calcaire broyé et le gypse. Ces études au champ permettront également de contrôler les écarts souvent obtenus entre les prévisions de laboratoire et la réalité au champ (facteur de chaulage).

La dynamique particulière du calcium et du potassium notée dans ce travail incite à **étudier l'échange Ca/K**, en raison des apports simultanés de calcaire broyé et de fumures potassiques.

Au cours de cette étude, il a été noté l'absence de phosphore dissous dans la solution du sol. Deux mécanismes, l'adsorption chimique et la précipitation, sont souvent évoqués pour expliquer le phénomène de fixation du phosphore (UDO et UZU, 1972). On sait d'une part qu'aux faibles teneurs en phosphore l'adsorption prévaut par rapport à la précipitation (LIN et *al*, 1983), et, d'autre part, qu'en sols acides l'adsorption est généralement attribuée à la présence des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium ainsi qu'à celle des minéraux argileux de type 1:1 (UDO et UZU, 1972 ; FOX et KAMPRATH, 1970 ; JUO et FOX, 1977). Selon JUO (1987), **il ne faut cependant pas exagérer cette fixation du phosphore** qui est surtout observée dans les sols dérivés des cendres volcaniques et des roches ferromagnésiennes comme les basaltes qui contiennent de grandes quantités d'allophane et des oxydes de Fe et Al à grande surface spécifique. Une étude, au laboratoire, de **l'adsorption du phosphore par ces sols, en relation avec**

l'amendement calcaire est nécessaire tout comme un suivi de la **dynamique à long terme du phosphore labile sous culture**. D'autres études liées aux effets rhizosphériques peuvent être envisagées.

L'activité faunique a été évoquée dans les hypothèses concernant le fractionnement, la transformation et l'enfouissement des résidus de récolte et le brassage du sol. **Le rôle des termites sur l'agrégation biologique et l'intégration de la matière organique** est mal connu dans les sols sous culture de manioc du Congo et devrait faire l'objet d'une recherche approfondie.

Il est apparu que les sols étudiés, particulièrement ceux de la Vallée du Niari sont relativement pauvres en magnésium échangeable. Or, la déficience en magnésium a été reconnue comme une cause possible des réponses négatives des sols acides à l'amendement calcaire (SUMNER et *al*, 1978), c'est-à-dire un facteur non négligeable dans l'expression de déséquilibres entre les éléments minéraux (SUMNER et *al*, 1991). Des cultures en solutions nutritives ont montré que la déficience en magnésium contribuait à l'apparition des syndromes de toxicité aluminique chez trois variétés de sorgho (TAN et *al*, 1993) et de toxicité manganique chez des plants de blé (GOSS et CARVALHO, 1992). Il serait judicieux de suivre l'évolution du magnésium apporté dans des essais de correction en relation avec l'acidité du sol.

Telles sont, en conclusion, quelques voies de recherche à développer pour améliorer encore les connaissances sur le **fonctionnement** de ces **sols acides** et envisager de nouvelles pratiques culturales contribuant à une **meilleure gestion** de ces zones de savane vouée à la culture mécanisée.

CONCLUSION

«Par une prérogative particulière, non seulement chacun des hommes s'avance de jour en jour dans les sciences, mais (...) tous les hommes y font un continuel progrès à mesure que l'univers vieillit» (Blaise PASCAL - Préface sur le Traité du Vide).

Le maintien d'une production agricole durable et la conservation des ressources en sols passent, dans un contexte agro-socio-économique donné, par une bonne compréhension du comportement des sols sous culture.

Cette étude de l'acidité du sol et de sa correction a porté sur les sols ferrallitiques de plateau de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

A l'issue de la présentation des sols acides d'intérêt agricole dans leur contexte naturel (chapitre 1), ce travail a procédé à une première évaluation des pratiques utilisées dans la correction de l'acidité, notamment le recours au calcaire broyé de Madingou (chapitre 2). Grâce à des observations et prélèvements d'échantillons de sol dans des situations culturales contrastées, il a été établi un **constat de dégradation des propriétés physico-chimiques des sols sous culture**. L'examen de la garniture cationique du complexe fait ressortir des **risques élevés de toxicité aluminique sur le plateau de Mbé-Batéké, alors que c'est le manganèse qui est à craindre dans la Vallée du Niari**.

Cependant, la disparité des modes d'apport de ce calcaire (épandage uniforme, localisé le long de la ligne de plantation ou en rond autour des pieds de manioc) rend difficile la comparaison de leurs effets et assez aléatoire la représentativité des prélèvements effectués.

Ces difficultés ont rendu nécessaire une nouvelle approche méthodologique basée sur des modèles expérimentaux de laboratoire, afin de mieux apprécier l'impact de ces apports sur les caractéristiques du sol, en particulier les propriétés d'échange.

Ainsi, des études plus fines ont été mises en oeuvre, concernant la nature et la réactivité du complexe d'échange (chapitre 3). Les constituants minéraux des sols ont été caractérisés ainsi que leur réactivité, en privilégiant la prévision de leur comportement global lors de l'acidification du sol ou la correction de l'acidité.

La présence en proportions non négligeables d'oxyde de manganèse uniquement dans le sol de la Vallée du Niari et de gibbsite dans celui du plateau de Mbé-Batéké confirme les risques de toxicités dues au manganèse dans le premier cas et à l'aluminium dans le second cas. Le pouvoir tampon du sol est plus fort dans le sol du Niari qui présente en outre une CEC trois fois plus élevée à pH identique.

Les deux sols argileux du Niari et sableux de Mbé-Batéké présentent une **tendance naturelle à s'acidifier**.

La nécessité de corriger l'acidité apparaît nettement car il s'agit de relever le pH dans une gamme permettant de réduire l'influence de l'aluminium

sur le complexe d'échange, optimiser la CEC et la fourniture des nutriments aux plantes. Il est évident que des manipulations appropriées du pH du sol sont cruciales pour une gestion correcte et efficace de ces sols.

A cet égard, la méthode basée sur le pouvoir tampon du sol permet de calculer et de moduler les apports de calcaire broyé pour atteindre une valeur de pH donnée. Elle concorde bien pour les valeurs de $\text{pH} < 6$, avec la méthode par incubation qui sert de référence.

Des études en modèles expérimentaux de laboratoire ont porté, pour chacun des sols étudiés sur l'horizon supérieur, directement concerné par l'apport de calcaire et exploré par les racines des plantes cultivées. Des tests de comportement utilisant plusieurs approches ont été effectuées :

- essais de **correction de l'acidité** : incubation d'une durée de trois mois pour l'étude des effets de trois doses de calcaire broyé de Madingou combinées ou non à une dose unique de matière végétale (*Pueraria javanica*) sur quelques caractéristiques du sol ;

- appréciation des modifications de la **dynamique d'échange à l'interface sol-solution**, donc de la susceptibilité du sol à libérer des éléments dans la solution du sol par :

- * désorption avec entraînement des éléments minéraux par gravité, simulant la lixiviation sous pluviométrie locale (colonnes de sol, rapport sol/solution proche des conditions naturelles) ;

- * cinétique de séparation des éléments du sol sous l'effet d'un champ électrique (électrodialyse), avec un rapport sol/solution de 1/10 ;

- * absorption des éléments minéraux par une plante-test, le *ray grass* d'Italie cultivé sous serre, en vases de végétation : tentative de validation de la série de tests de diagnostic de la mobilité et la disponibilité des éléments minéraux

Les résultats obtenus font apparaître, du point de vue méthodologique, l'intérêt d'utiliser des approches complémentaires dans l'appréciation de la disponibilité des nutriments pour les plantes cultivées. L'intérêt de ces tests et

déterminations ainsi que leur complémentarité apparaît nettement dans les enseignements tirés des résultats obtenus. Par ailleurs, les problèmes inhérents à la détermination des cations échangeables d'un sol acide ayant reçu un amendement calcaire peuvent être limités par l'utilisation de la méthode au chlorure de cobalthexamine.

Du point de vue agronomique, il apparaît une amélioration des spectres cationiques du complexe adsorbant des sols ; l'apport de calcaire broyé fournit simultanément du calcium et du magnésium au sol et l'intérêt du *Pueraria javanica* réside surtout dans l'apport de potassium dont la presque totalité passe sous forme échangeable.

Les résultats de l'essai d'appréciation des pertes par lixiviation confirment l'importance des pertes en cations échangeables. Les pertes en calcium importantes et l'absence de lixiviation du manganèse expliquent et confirment la relation notée au Niari, entre décalcification du complexe, acidification du sol et toxicité manganique.

Le présent travail développe ainsi une synergie entre activités de terrain et expérimentations de laboratoire.

En définitive, les potentialités agricoles qu'offrent les sols argileux de la Vallée du Niari et sableux du plateau de Mbé-Batéké sont limitées par une **acidité naturelle doublée d'une empreinte anthropique**.

L'utilisation de l'amendement calcaire apparaît donc indispensable dans la gestion de la fertilité des sols sous culture mécanisée intensive, mais la question de rentabilité économique de l'amendement, qui est liée à toutes les autres composantes de l'itinéraire technique et aux exigences de l'espèce végétale cultivée, reste à préciser.

Le système cultural doit permettre de soutenir durablement les rendements des cultures tout en conservant le capital sol. Il doit ainsi combiner un

travail du sol assurant une bonne agrégation, un apport d'amendements calcaires maintenant ou relevant le pH au-dessus de 5,5, une couverture efficace du sol réduisant au minimum la lixiviation et entretenant un niveau de matière organique suffisant.

A cet égard, ce travail contribue à une meilleure connaissance du fonctionnement physico-chimique de ces sols, de la dynamique des ions apportés et du rôle de la capacité d'échange, afin de mieux raisonner l'amendement en fonction du sol. L'amendement calcaire intègre ainsi une stratégie opérationnelle destinée à maintenir une productivité agricole durable qui découlera de nouvelles conceptions d'agrosystèmes qui intègrent la conduite agricole avec le niveau des ressources existantes et les conditions écologiques locales.

Ce travail a montré que les caractéristiques de charge de surface des sols sont d'une importance capitale dans la gestion de ces sols, car la majorité des réactions qui contrôlent la disponibilité des nutriments sont dépendantes des processus physico-chimiques qui ont lieu à la surface des particules.

Ce travail constitue plus un modèle de ce qui peut être fait qu'un bilan complet. Les sols acides du Congo constituent donc un champ scientifique large qui n'est encore que défriché. C'est dire l'importance du travail qui reste à mener et il est nécessaire de poursuivre l'effort de recherche sur les sols acides du Congo ainsi que leur évolution sous culture.

L'objectif visé est d'installer une agriculture plus autonome, économe en ressources, efficace sur le plan énergétique, économiquement fiable et socialement acceptable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMS F., LUND Z.F., 1966 - Effect of chemical activity of soil solution aluminum on cotton root penetration of acid subsoils. *Soil Sci.*, 101:193-198.
- AFNOR, 1994 - Qualité des sols. Recueil de normes françaises, 249 p.
- AHMAD F., TAN K.H., 1986- Effect of lime and organic matter on soybean seedlings grown in aluminum-toxic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50(3):656-661.
- AMEDEE G., 1974 - Liming of highly weathered soils of the humid tropics. Ph. D. thesis, Cornell Univ., 81 p.
- AMEDEE G., PEECH, M., 1976 - The significance of KCl-extractable Al(III) as an index to lime requirement of soils in the humid tropics. *Soil Sci.*, 121(4):227-233.
- ANKOMAH A.B., 1991 - Filtration-rate technique for determining zero point of charge of iron oxides. *Clays and clay Minerals*, 39(1):100-102.
- ARRIVETS J., 1988 - Note sur le «projet manioc FAC» en août 1988. Doc ronéo, Brazzaville, 20 p.
- AUBERT G., 1955 - Observations sur quelques sols mis en culture à Loudima (Moyen-Congo). ORSTOM, Brazzaville, 6 p.
- AUBREVILLE A., 1949 - Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Paris, Larose, 351 p.
- BARBER S.A., 1984 - Liming materials and practices. In *Soil acidity and liming*. 2nd ed., ADAMS F. (editor), Agron. Monogr. n°12, SSSA, Madison, pp 171-209.
- BIGHAM J.M., GOLDEN D.C., BUOL S.W., WEED S.B., BOWEN L.H., 1978 - Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols : II. Influence on color, surface area, and phosphate retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42(5):825-830.
- BLANCHET R., 1979 - Les formes des éléments dans le sol et la nutrition des plantes : généralités. In BONNEAU M. et SOUCHIER B. (éditeurs) - *Pédologie*, tome 2 : Constituants et propriétés du sol. Masson, chap. XX, pp 366-371.
- BLANCHET R., BOSC M., MAERTENS C., PUECH J., 1974 - Influence des différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. II. Influence de l'humidité du sol et des flux hydriques sur l'absorption des éléments minéraux par les racines. *Ann. agron.*, 25(6):681-696.

- BLIC Ph. de, 1990 - L'examen du profil cultural : un outil pour mieux comprendre le comportement du sol soumis à des travaux aratoires. *In Organic matter management and tillage in humid and subhumid Africa. IBSRAM proceedings n°10, Bangkok, pp 385-399.*
- BLOOM P.R., McBRIDE M.B., WEAVER R.M., 1979 - Aluminum organic matter in acid soils : buffering and solution aluminum activity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43(3):488-493.
- BOCQUIER G., GUILLEMIN R., 1959 - Aperçu sur les principales formations pédologiques de la république du Congo. Haut-Commissariat général, IEC, ORSTOM, 139 p. *In GUILLEMIN R. (1959) - Les facteurs physiques conditionnant la production agricole de la république du Congo-Brazzaville. Commissariat au plan, Brazzaville, 244 p.*
- BOISSEZON P. de, 1965 - Les sols de savane des plateaux Batéké. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III(4):391-418.
- BOISSEZON P. de, 1970 - Etude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte-d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VIII(4):391-418.
- BOISSEZON P. de, MARTIN G., 1967 - Les sols de la Vallée du Niari : étude pédologique et agropédologique. *In* Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays de Niari. Vol. 3, ORSTOM editeur, 145 p.
- BOISSEZON P. de, MARTIN G., GRAS F., 1969 - Les sols du Congo. Notice explicative de la carte pédologique au 1/200 000^e. Doc. ORSTOM, multigraph., Brazzaville, 60 p.
- BOLLAND M.D.A., POSNER A.M., QUIRCK J.P., 1976 - Surface charge on kaolinites in aqueous suspension. *Aust. J. Soil Res.*, 14:197-216.
- BOLT G.H., BRUGGENWERT M.G.M., 1978 - Soil chemistry : A. Basic elements. Development in Soil Science 5A, Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam, 281 p.
- BOURRIE G., 1990 - Conséquences de l'existence de complexes polynucléaires de Al(III) sur la stabilité de minéraux alumineux : une reconsidération du système gibbsite-kaolinite-quartz. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 310, série II, 765-770.
- BOWDEN J.W., POSNER A.M., QUIRK J.P., 1980 - Adsorption and charging phenomena in variable charge soils. *In* THENG B.K.G. (editor) Soils with variable charge. New Zealand Society of Soil Science, pp 147-166.

- BOYER J., 1976 - L'aluminium échangeable : incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XIV(4):259-269.
- BOYER J., 1978 - Le calcium et le magnésium dans les régions tropicales et subhumides. ORSTOM, Init. Doc. Tech., n° 35, 173 p.
- BOYER J., 1982 - Les sols ferrallitiques. Tome 10 : Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Coll. Initiations-Documentations techniques, ORSTOM, Paris, 384 p.
- BRADY N.C., 1990 - The nature and properties of soils. 10th edition. Macmillan Publishing Company, New York, 621 p.
- BRAUDEAU E., 1984 - Evolution des sols sous culture mécanisée, essais «systèmes de culture» du CRAL. A - Constat physico-chimique des horizons humifères en octobre 1983 après 4 années de culture. Doc. ronéo. ORSTOM, Brazzaville, 38 p.
- BROOKE H.D., COVENTRY D.R., REEVES T.G., JARVIS D.K., 1989 - Liming and deep ripping responses for a range of field crops. *Plant and Soil*, 115:1-6.
- BRUCKERT S., ROUILLER J., 1979 - Mécanismes de régulation du pH des sols. In BONNEAU M. et SOUCHIER B. (éditeurs) - Pédologie, tome 2 : Constituants et propriétés du sol. Masson, chap. XIX, pp 354-365.
- BRUGIERE J.M., 1951 - Mission pédologique sur les plateaux Batéké. Doc. Institut d'Etudes Centrafricaines (IEC), Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), 20 p. + carte h.t. au 1/500 000.
- BRUGIERE J.M., 1953 - Etude pédologique de la Vallée du Niari. Institut d'Etudes Centrafricaines (IEC), Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), 2 tomes, Doc. ronéo., 300 p. + cartes h.t. au 1/500 000 et 1/100 000.
- CAILLERE S., HENIN S., RAUTUREAU M., 1982 - Minéralogie des argiles. II. Classification et nomenclature. 2^e édition, Collection Actualités scientifiques et agronomiques de l'INRA. Masson, Paris, 189 p.
- CALLOT G., CHAMAYOU H., MAERTENS C., SALSAC L., 1982 - Mieux comprendre les interactions sol-racine : incidence sur la nutrition minérale. Publications de l'INRA, Paris, 325 p.

- CAMBIER Ph., 1986 - Organisation des constituants et interactions physico-chimiques au sein des agrégats de sols. Application au système ferrallitique kaolinite-oxyde de fer. Thèse de doctorat, Sciences physiques, Univ. Paris VI, 223 p.
- CAMBIER Ph., PICOT C., 1988 - Nature des liaisons kaolinite-oxyde de fer au sein des agrégats d'un sol ferrallitique. *Sci. du Sol, Bull. AFES*, 26(4):223-238.
- CELAC, 1990 - Les amendements calciques et magnésiens. Doc. du Comité d'Etudes et de Liaison des Amendements Calcaires et Magnésiens, 28 p.
- CHAMAYOU H., LEGROS J.-P., 1989 - Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Coll. Techniques vivantes, Aence de coopération culturelle et technique (ACCT), Conseil international de la langue française, PUF, 593 p.
- CHANG S.C., JACKSON M.L., 1957 - Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 84:113-144. (cité par DZABA, 1987).
- CHARLOT G., 1974 - Chimie analytique quantitative : II- méthodes sélectionnées d'analyse chimique des éléments. 6^{ème} édition refondue, Masson et C^{ie} éd., Paris, 571 p.
- CHATELIN Y., 1974 - Les sols ferrallitiques. Tome III- L'altération. Coll. Initiations Documentations Techniques n°24. ORSTOM, Paris, 144 p.
- CHAUSSIDON J., 1979 - Complexe absorbant. Lois générales d'échange des anions et des cations. In BONNEAU M. et SOUCHIER B. (éditeurs) - Pédologie, tome 2 : Constituants et propriétés du sol. Masson, chap. XVIII, pp 333-353.
- CHAUVEL A., PEDRO G., TESSIER D., 1976 - Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. *Science du sol, Bulletin de l'AFES*, (2):101-105.
- COCHRANE T.T., SALINAS J.G., SANCHEZ P.A., 1980 - An equation for liming acid mineral soils to compensate crop aluminium tolerance. *Trop. Agric.*, 57(2):133-140.
- COLEMAN D., OADES J.M., UEHARA G., 1989 - Introduction : soil organic matter : tropical vs. temperate. In Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. NifTAL Project, Honolulu, Hawaii, pp 1-4.
- COLEMAN N.T., THOMAS G.W., 1967 - The basic chemistry of soil acidity. In Soil acidity and liming. R.W. Pearson and F. Adams (editors), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, *Agron. Monogr.* n. 12, pp 1-41.

- COMBEAU A., QUANTIN P., 1964 - Observations sur les relations entre la stabilité structurale et la matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, II(1):3-12.
- COPPENET M., AILLIOT B., CARIOU G., COLOMB B., DARRE J., HAUT R., 1986 - Etat calcique des sols et fertilité : le chaulage. Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER), Association de Coordination Technique Agricole (ACTA), Paris, 166 p.
- CPCS, 1967 - Classification morphogénétique des sols. Laboratoire de Géologie-pédologie ENSA Montpellier, 88 p., multigr.
- CURTIN D., SMILLIE G.W., 1983 - Soil solution as affected by liming and incubation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:701-707.
- DABIN B., 1965 - Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, III(4):355-366.
- DABIN B., 1985 - Les sols tropicaux acides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXI(1):7-19.
- DADET P., 1969 - Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo-Brazzaville au 1/500.000 (zone comprise entre les parallèles 2° et 5° Sud). Mémoires du BRGM, n°70, 103 p. + 1 carte hors-texte.
- DELVAUX B., 1988 - Constituants et propriétés de surface des sols dérivés de pyroclastes basaltiques du Cameroun occidental. Approche génétique de leur fertilité. Thèse de docteur en Sciences agronomiques, Faculté des Sciences agronomiques, Université Catholique de Louvain, Belgique, 335 p. + annexes.
- DENIS B., 1971 - Etude pédologique de la zone de Kinkala-Madingou. Doc. ORSTOM, Brazzaville, multigr., 379 p. + cartes h.t.
- DENIS B., 1974 - Notice explicative de la carte pédologique au 1/200 000 de la zone de Brazzaville-Kinkala. Rép. Pop. du Congo. ORSTOM, Paris, n° 52, 101 p. + 1 carte h.t.
- DENIS B., RIEFFEL J.M., 1975 - Notice explicative de la carte pédologique de Madingou. Doc. ORSTOM, n° 60, Paris, relié, 152 p.
- DEWIS J., FREITAS F., 1970 - Calcium carbonate acid neutralization. *In Soils Bulletin*, n.10, FAO, Rome, pp 71-72.

- DJONDO M.Y., 1987 - Incidence du brûlis et du calcaire sur la symbiose fixatrice d'azote et les rendements de trois variétés d'arachide (*Arachis hypogaea L.*). Mémoire d'Ingénieur de Développement Rural, IDR, UMNG, Brazzaville, 102 p., avec annexes.
- DOERGE T.A., GARDNER E.H., 1988 - Comparison of four methods for interpreting the Shoemaker-McLean-Pratt (SMP) lime requirement test. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1054-1059.
- DOLLING P.J., RITCHIE G.S.P., 1985 - Estimates of soil solution ionic strength and the determination of pH in West Australian soils. *Aust. J. Soil Res.*, 23:309-314.
- DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970 - Ecologie microbienne du sol. Masson et C^{ie}, Paris, 796 p.
- DOULBEAU S., 1991 - Séparation par électrodialyse des éléments retenus par un sol. Application à la séparation des formes de fer ferreux présentes dans un sol saturé d'eau. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXVI(3):213-226.
- DUCHAUFOUR Ph., 1991 - Pédologie. Sol, végétation, environnement. Troisième édition entièrement renouvelée. Coll. Abrégés, Masson ed., Paris, 289 p.
- DUXBURY J.M., SMITH M.S., DORAN J.W., 1989 - Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*, edited by D. Coleman, J.M. Oades and G. Uehara, NifTAL Projet, Univ. of Hawaiï.
- DZABA D., 1984 - Diagnostic des carences minérales des sols de la station agronomique régionale d'Odziba par l'expérimentation en vase de végétation. *Sciences et Technologies*, Brazzaville, (3):21-22.
- DZABA D., 1987 - Contribution à l'étude de l'influence des amendements calcaires sur la dynamique du phosphore des sols acides de la république populaire du Congo et ses conséquences sur la nutrition phosphorique des plantes. Thèse de doctorat en Sciences agronomiques, Faculté des Sciences agronomiques de l'état, Gembloux (Belgique), 293 p.
- ERHART H., 1947 - Etude pédologique des plateaux Batéké et de la Vallée du Niari. ORSTOM, Brazzaville, 5 p.
- ESPIAU P., 1986 - Contribution à l'étude du complexe absorbant des sols acides à charges mixtes. Application aux Andosols du Velay. Thèse de doctorat d'état, USTL, Montpellier, 338 p.

- ESPIAU P., 1987 - Contribution à l'étude du complexe absorbant des sols acides à charges mixtes. Application aux Andosols du Velay. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXIII(2):79-94.
- ESPIAU P., 1994 - Le complexe adsorbant. In *Pédologie*, tome 2 : Constituants et propriétés du sol. M. BONNEAU et B. SOUCHIER (éditeurs), 2^e édition, pp 489-510.
- ESPIAU P., PEDRO G., 1980 - Caractérisation du complexe d'échange des sols acides. Le taux d'acidité d'échange et sa signification pédogénétique sous climat tempéré. *Ann. Agron.*, 31(4):363-383.
- ESPIAU P., PEDRO G., 1986 - Caractérisation du complexe absorbant des sols acides - CEC et taux d'acidité d'échange. In *La capacité d'échange cationique et la fertilisation des sols agricoles*. Y. AMIET (éditeur), AFES, Chambre d'agriculture de Basse-Normandie, pp 129-153.
- ESPIAU P., PEYRONNEL A., 1976 - L'acidité d'échange dans les sols. Méthode de détermination de l'aluminium échangeable et des protons échangeables. *Science du sol, Bull. AFES*, (3):161-175.
- ESWARAN H., STOOPS G., 1979 - Surface texture of quartz in tropical soils. *Soil Sci.Soc.Am. J.*, 43:420-424.
- ESWARAN H., TAVERNIER R., 1980 - Classification and genesis of oxisols. In THENG B.K.G. (editor) *Soils with variable charge*. New Zealand Society of Soil Science, pp 427-442.
- EVANS C.E., KAMPRATH E.J., 1970 - Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 34:893-896.
- FALLAVIER P., 1985 - Densité de charge variable et point de charge nulle dans les sols tropicaux : définition, mesure et utilisation. *L'Agron. Trop.*, 40(3):239-245.
- FALLAVIER P., BABRE D., BREYSSE M., 1985 - Détermination de la capacité d'échange des sols tropicaux acides. *L'Agron. Trop.* 40(4):298-308.
- FALLAVIER P., OLIVIN J., 1988 - Etude expérimentale de la dynamique du potassium et du magnésium dans quelques sols tropicaux représentatifs des zones de culture du palmier à huile. *Oléagineux*, 43(3):93-102.
- FAO/UNESCO, 1976 - Carte mondiale des sols, 1 : 5 000 000. Vol. VI : Afrique. Paris, 307 p.

- FLIS S. E. GLENN A.R., DILWORTH M.J., 1993 - The interaction between aluminium and root nodule bacteria. *Soil Biol. Biochem.* 25(4):403-417.
- FOX R.L., KAMPRATH E.J., 1970 - Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:902-907.
- FOY C.D., 1984 - Physiological effects of hydrogen, aluminium and manganese toxicities in acid soils. *In Soil acidity and liming* . 2nd ed., F. Adams (editor), Am. Soc. Agron., Madison, pp 57-97.
- FRANQUIN P., 1958 - L'estimation du manganèse du sol en rapport avec le phénomène de toxicité. *Coton et Fibres Tropicales*, XIII(3):1-16.
- GALLEZ A., JUO A.S.R., HERBILLON A.J., 1976 - Surface and charge characteristics of selected soils in the tropics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40(4):601-608.
- GARNIER-SILLAM E., VILLEMEN G., TOUTAIN F., RENOUX J., 1985 - Formation de microagrégats organo-minéraux dans les fèces de termites. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 301, sér. III, (5):213-218.
- GILLMAN G.P., 1991 - The chemical properties of acid soils with emphasis on soils of the humid tropics. *In Plant-soil interaction at low pH*. WRIGHT et al. (editors), Kluwer Academic Publishers, pp 3-14.
- GILLMAN G.P., BRISTOW K.L., HALLMAN M.J., 1989 - Leaching of applied calcium and potassium from an oxisol in humid tropical Queensland. *Aust. J. Soil Res.*, 27:183-198.
- GIRESE P., 1990 - Esquisse géologique de l'Afrique centrale occidentale. *In R. LANFRANHI et D. SCHWARTZ (eds) - Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique*. Coll. Didactiques, Edition ORSTOM, pp 15-19.
- GOSS M.J., CARVALHO M.J.G.P.R., 1992 - Manganese toxicity : the significance of magnesium for the sensitivity of wheat plant. *Plant and Soil*, 139:91-98.
- GUILLOT B., PEYROT B., 1979 - Etude du fonctionnement des vallées sèches du plateau de Mbé (Congo). Problèmes hydrologiques et morphologiques. *Cah. ORSTOM, sér. Sci. Hum.*, XVI(3):205-231.
- HAIRIAH K., VAN NOORDWIJK M., SETIJONO S., 1993 - Tolerance to acid conditions of the velvet beans *Mucuna pruriens* var. *utilis* and *M. deeringiana*. *Plant and Soil*, 152:175-1785.

- HARGROVE W.L., THOMAS G.W., 1981 - Effect of organic matter on exchangeable aluminum and plant growth in acid soils. *In Chemistry in the soil environment*. Am. Soc. Agron., special publication n° 40, pp 151-166.
- HARGROVE W.L., THOMAS G.W., 1982 - Titration properties of Al-organic matter. *Soil Science*, 134(4):216-225.
- HARGROVE W.L., THOMAS G.W., 1984 - Extraction of aluminium from aluminium organic matter in relation to titratable acidity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1458-1460.
- HARTWIG R.C., LOEPPERT R.H., 1992 - A pH-stat procedure for evaluating reactivity of agricultural limestone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56(1):302-308.
- HAYNES R.J., LUDECKE T.E., 1981 - Effect of lime and phosphorus applications on concentrations of available nutrients and on P, Al and Mn uptake by two pasture legumes in an acid soil. *Plant and Soil*, 62:117-128.
- HELIAR K.R., PORTER W.M., 1989 - Soil acidification, its measurement and the processes involved. *In Soil acidity and plant growth*, ROBSON A.D. (editor), Academic Press, Sidney, pp 61-101.
- HERBILLON A.J., 1974 - Modification des propriétés de charge provoquées par l'altération chimique : rôle du processus de désilicification. *Pédologie*, 24(2):100-118.
- HERBILLON A.J., 1980 - Mineralogy of Oxisols and oxic materials. *In THENG B.K.G. (editor) Soils with variable charge*. New Zealand Society of Soil Science, pp 109-126.
- HERBILLON A.J., 1988 - Introduction to the surface charge properties of iron oxides and oxidic soils. *In J.W. STUCKI et al., (eds), Iron in soils and clay minerals*, chapter 10, 251-266.
- HERBILLON A.J., 1994 - Oxyde de fer, gibbsite, oxydes de manganèse et minéraux allophaniques. *In Pédologie*, tome 2 : Constituants et propriétés du sol. M. BONNEAU et B. SOUCHIER (éditeurs), 2e édition, pp 17-46.
- HERBILLON A.J., FRANQUART R., VIELVOYE L., 1981 - An occurrence of interstratified kaolinite-smectite minerals in a red-black soil toposequence. *Clay Min.* 16:195-201.
- HODGES S.C., 1987 - Aluminium speciation : a comparison of five methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:57-64.

- HORST W.J., 1988 - The physiology of manganese toxicity. *In* R.D. GRAHAM *et al.* (eds), *Manganese in soils and plants*. Kluwer Academic Publishers, *pp* 175-188.
- HOSSNER L.R., JUO A.S.R., 1989 - Mineralogical and chemical properties. *In* First training workshop on acid tropical soils management and land development practices. IBSRAM, *pp* 59-78.
- HUMBEL F.X., 1987 - Relations entre la porosité et le pédoclimat dans les sols du domaine ferrallitique au Cameroun. *In* Land development-management of acid soils, Défrichement et mise en valeur des sols acides. IBSRAM Proceedings n°4, *pp* 41-52.
- IBSRAM (International Board for Soil Research and Management Inc.), 1987 - Land development and management of acid soils in Africa, Proceedings of the second workshop on Land development and management of acid soils in Africa, Lusaka and Kasama, Zambia, 9-16 april 1987. IBSRAM Proceeding n° 7.
- IBSRAM, 1989 - Acid tropical soils management and land development practices. First training workshop held at the Yurimaguas Experiment Station, Péru. IBSRAM Technical Notes n°2, 242 p.
- JACKSON M.L., LIM C.H., ZELAZNY L.W., 1986 - Oxides, hydroxydes and aluminosilicates. *In* Methods of soil analysis, part 1 : Physical and mineralogical methods. 2nd edition. Am. Soc. of Agron., Inc., Soil Sci. Soc. of America, Inc., Madison, *pp* 101-150.
- JAMET R., 1975 - Evolution des principales caractéristiques des sols des reboisements de Loudima (Congo). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XIII(3/4):235-253.
- JEANROY E., 1983 - Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées. Evaluation par les réactifs chimiques d'extraction et apports de la spectrométrie Mössbauer. Thèse Université de Nancy I, 168 p.
- JULIA H., 1953 - Observations concernant l'incidence de la couverture du sol sur le maintien de la fertilité des terres cultivées dans la Vallée du Niari. *Oléagineux*, 8(7):489-665.
- JUO A.S.R., 1987 - Mineralogical characteristics of lateritic soils with special reference to site selection for soil management research. *In* Land development-management of acid soils, Défrichement et mise en valeur des sols acides. IBSRAM Proceedings n°4, *pp* 125-134.
- JUO A.S.R., FOX R.L., 1977 - Phosphate sorption characteristics of some benchmark soils of West Africa. *Soil Sci.*, 124:370-376.

- JUO et UZU, 1977 - Liming and nutrient interactions in two ultisols from Southern Nigeria. *Plant and Soil*, 47:419-430.
- KAMPRATH E.J., 1970 - Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:252-257.
- KOECHLIN J., 1961 - La végétation des savanes dans le sud du Congo. ORSTOM, Paris, 311 p.
- LA SOUCHERE P. de, 1974 - Etude pédologique de trois terrains situés aux environs des villages Odziba, Imbama, Mbé (plateau de Mbé). 9 fig. + 2 dépl. H.T., 61 + 12 p.
- LATHAM M., 1987 - IBSRAM's soil management approach. In IBSRAM (1987), AFRICALAND, pp 11-18.
- LE MARECHAL A., 1966 - Contribution à l'étude des plateaux Batéké. Géologie, géomorphologie et Hydrogéologie. Doc. ronéo, ORSTOM Brazzaville, 42 p. + 4 cartes h.t.
- LIN C., BUSSCHER W.J., DOUGLAS L.A., 1983 - Multifactor kinetics of phosphate reactions with minerals in a acidic soils . I- Modeling and simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1097-1103.
- LOMBAERT V., 1987 - Micro-cultures. Méthode Stanford - de Ment. *Les dossiers agronomiques d'Aspach Le Bas*, (2):59-86.
- LUMBARANJA J., EVANGELOU V.P., 1991 - Acidification and liming on surface charge behavior of Kentucky subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55(1):26-34.
- MAKANY L., 1976 - Végétation des plateaux Téké (Congo). Coll. Travaux de l'Université de Brazzaville, relié, 301 p.
- MANICHON H., 1982 - L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. *Sci. du sol*, 3:203-219.
- MANRIQUE L.A., 1986 - The relationship of soil pH to aluminum saturation and exchangeable aluminum in ultisols and oxisols. *Comm. in Soil Sci. Plant Anal.*, 17(4):439-455.
- MAPANGUI A., 1992 - Etude de l'organisation et du comportement de sols ferrallitiques argileux de la Vallée du Niari (Congo). Conséquences sur l'évolution physique sous culture de manioc en mécanisé depuis 15 ans. Thèse, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 246 p.
- MARCANO-MARTINEZ E., MCBRIDE M.B., 1989 - Comparison of the titration and ion adsorption methods for surface charge measurement in oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1040-1045.

- MARSCHNER H., 1986 - Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 674 p.
- MARSCHNER H., 1991 - Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant and Soil*, 134(1):1-20.
- MARTIN D., 1975 - Complexe agro-industriel de Mantsoumba : étude pédologique de la ferme de Mantsoumba. Doc. ORSTOM, B/ville, multigr. 40 p.
- MARTIN D., 1979 - Fertilité chimique des sols d'une ferme du Congo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XVII(1):47-64.
- MARTIN G., 1958 - Essai de bilan de quatre années d'études pédologiques dans la Vallée du Niari. Doc. Haut-commissariat de la rép. en Afrique Equatoriale Française, Bureau des sols, ORSTOM, B/ville, multigr., 89 p.
- MARTIN G., 1959 - La décalcification des terres au Niari : action des amendements calcaires. *Oléagineux*, 14(4):213-219.
- MARTIN G., 1961 - Essai d'appréciation des pertes en calcium et en magnésium après un apport d'amendement calcaire dans les sols de la Vallée du Niari. Doc. IEC, ORSTOM, multigr., 39 p.
- MARTIN G., 1963 - Détérioration de la structure des sols sous culture mécanisée dans la Vallée du Niari. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, (2):8-14.
- MARTIN G., 1970 - Synthèse agro-pédologique des études ORSTOM dans la Vallée du Niari en République du Congo-Brazzaville. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, VII(1):63-79.
- MAUMON M., GRIVEAU M., 1968 - Quinze ans de travaux et de recherches dans les Pays de Niari. Synthèse générale. Ministère de la Coopération, République du Congo, 215 p.
- MBOM J.B., 1991 - Etude de l'influence d'apports de doses croissantes d'amendement calcique sur certaines caractéristiques physico-chimiques de quatre sols acides du Niari. Mémoire d'Ingénieur de Développement Rural, IDR, UMNG, Brazzaville, 92 p.
- McLEAN E.O., 1976 - Chemistry of soil aluminum. *Comm. in Soil Sci. Plant Anal.*, 7(7):619-636.
- MEHRA O.P., JACKSON M.L., 1960 - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 7:317-327.
- MEIJER E.L., BUURMAN P., 1987 - Salt effect in a multicomponent variable charge system : curve of zero salt effect, registered in a pH-stat. *Journal of Soil Science*, 38:239-244.

- MENGEL K., KIRKBY E.A., 1982 - Principles of plant nutrition. International Potash Institute, Berne, Switzerland, 593 p.
- MESTDAGH M.M., VIELVOYE L., HERBILLON A.J., 1980 - Iron in kaolinite. II- The relationship between kaolinite cristallinity and iron content. *Clay min.* 15:1-13.
- MICROSOFT, 1993 - Microsoft Excel : fonctions et macros. Microsoft Corporation, 581 p.
- MORAIS F.I., PAGE A.L., LUND L.J., 1976 - The effect of pH, salt concentration, and nature of electrolytes on the charge characteristics of brazilian tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40(4):521-527.
- MOREAU R., 1978- Influence de l'ameublissement mécanique et de l'infiltration d'eau sur la stabilité structurale d'un sol ferrallitique dans le centre de la Côte-d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XVI(4):413-424.
- MOREAU R., 1985 - Perspectives pour un projet IBSRAM (Sol/Manioc) au Congo. Rapport de mission du 3 au 15 décembre 1984. ORSTOM, Bondy ,15 p.
- MOREAU R., GODEFROY J., 1985 - Problèmes des zones tropicales et équatoriales forestières. *C.R. Acad. Agr. de France*, 71(10):1169-1179.
- MPOUNZA M., SAMBA-KIMBATA M.J., 1990 - Aperçu sur le climat de l'Afrique centrale occidentale. *In Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique.* R. LANFRANHI et D. SCHWARTZ (eds). Coll. Didactiques, Editions de l'ORSTOM, pp 31-41.
- NDANDOU J.F., 1992 - Etude de l'influence du temps de contact d'un amendement calcique avec le sol sur quelques caractéristiques physico-chimiques de quatre sols acides du Niari. Mémoire d'Ingénieur de Développement Rural, IDR, UMNG, Brazzaville, 52 p + annexes.
- NOBLE A.D., FEY M.V., SUMNER M.E., 1988 - Calcium aluminum balance and the growth of soybean roots in nutrient solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1651-1656.
- NOBLE A.D., SUMNER M.E., 1988 - Calcium and Al interactions and soybean growth in nutrient solutions. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1119-1131.
- NORDSTROM D.K., MAY H.M., 1989 - Aqueous equilibrium data for mononuclear aluminum species. *In SPOSITO G. (editor), Environment Chemistry of aluminum* CRC Press, chapter two.

- NORRISH K., TAYLOR R.M., 1961 - The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *J. Soil Sci.*, 12(2):294-306.
- NZILA J. de D., 1986 - Etude expérimentale de l'effet des amendements calciques sur un sol ferrallitique acide de la Vallée du Niari (Congo). Mémoire DEA fédéral de Pédologie, INA Paris-Grignon, 83 p.
- NZILA J. de D., 1992 - Etude des transformations structurales et physico-chimiques d'un sol ferrallitique acide de la Vallée du Niari (Congo) soumis à la pratique de l'écobuage. Thèse, Université Paris XII - Val de Marne, 190 p.
- OADES J.M., GILLMAN G.P., UEHARA G., 1989 - Interactions of soil organic matter and variable charge clays. In *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*, edited by D. Coleman, J.M. OADES and G. UEHARA, NITRAL Project, Univ. of Hawaiï, pp 69-95.
- OATES K.M., KAMPRATH E.J., 1983 - Soil acidity and liming: I. Effect of the extracting solution cation and pH on the removal of aluminum from acid soils. II. Evaluation of using aluminum extracted by various chloride salts for determining lime requirements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:686-692.
- OLIVER R., 1991 - Etude en colonnes de terre de la dynamique des cations sur un sol ferrallitique de la Vallée du Niari (Sud Congo). effet d'un amendement calcaire et des engrais minéraux sur la répartition dans le profil et la lixiviation des éléments minéraux. Compte-rendu d'expérience. Doc. IRAT, CIRAD, 29 p., annexes.
- OLLAGNIER M., PREVOT P., 1955 - Liaison entre dégradation du sol et toxicité manganique. *Oléagineux*, 10(10):663-664.
- ORSINI L., REMY J.C., 1976 - Utilisation du chlorure de cobaltihexamine pour la détermination de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Science du sol, Bulletin de l'AFES*, (4):269-275.
- PARFITT R.L., 1980 - Chemical properties of variable charge soils. In *Soils with variable charge*. THENG B.K.G. (editor), New Zealand Society of Soil Science, pp 167-194.
- PARKER J.C., ZELAZNY L.W., SAMPATH S., HARRIS W.G., 1979 - A critical evaluation of the extension of zero point of charge (ZPC) theory to soil systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53(4):668-674.
- PARKS G.A., DE BRUYN P.L., 1962 - The zero point of charge of oxides. *J. Phys. Chem.*, 66:967-973.

- PAVAN M.A., BINGHAM F.T., PRATT P.F., 1982 - Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 , and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1201-1207.
- PEDRO G., 1976 - Sols argileux et argiles : éléments généraux en vue d'une introduction à leur étude. *Sci. Sol*, Bull. AFES, (2):69-84.
- PEDRO G., 1979a - Les minéraux argileux. In BONNEAU M. et SOUCHIER B. (éditeurs) - Pédologie, tome 2 : Constituants et propriétés du sol. Masson, chap. III, pp 38-57.
- PEDRO G., 1979b - Caractérisation générale des processus de l'altération hydrolytique. *Science du sol*, *Bulletin de l'AFES*, (2-3):93-105.
- PEDRO G., 1985 - Les grandes tendances des sols mondiaux. *ORSTOM Actualités*, (11):11-14.
- PEDRO G., 1986 - Dynamique des ions dans le sol - rôle de la CEC - influence des grands types d'argile. In La capacité d'échange cationique et la fertilisation des sols agricoles. Y. AMIET (éditeur), AFES, Chambre d'agriculture de Basse-Normandie, pp 13-44.
- PEDRO G., 1987 - Géochimie, minéralogie et organisation du sol. Aspects coordonnés des problèmes pédogénétique. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, XXIII(3):169-186.
- PELLOUX P., DABIN B., FILLMANN G., GOMEZ P., 1971 - Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols. Doc. ORSTOM, sér. Initiations-Documentations-Techniques, n°17, 117 p.
- PETIT M., 1975 - Les paysages du calcaire dans la vallée du Niari et de la Nyanga. Travaux et documents n°22, CEGET, Bordeaux, pp 109-143.
- PIERI C., 1985 - Les perspectives d'intensification de la productivité des terres dans les zones de savanes intertropicales. *C.R. Acad. Agr. de France*, 71(10):1153-1168.
- PINTA M., 1980 - Spectrométrie d'absorption atomique. Tome II : Application à l'analyse chimique. 2^e édition, entièrement refondue. Masson, ORSTOM, Paris, pp 263-695.
- PLAISANCE G., CAILLEUX A., 1960 - Dictionnaire des sols. La Maison Rustique, Paris, 597 p.
- PODWOJEWSKI P., PETARD J., 1988 - Expression des sels solubles et des bases échangeables sur un vertisol calcimagnésique à gypse et à carbonates (La Tamoá, Nouvelle-Calédonie). ORSTOM, centre de Nouméa. Notes Techniques Sciences de la terre, Pédologie n°2, 75 p.

- PREVOT P., OLLAGNIER M., AUBERT G., BRUGIERE J.M., 1955 - Dégénération du sol et toxicité manganésienne. *Oléagineux*, 10(4):239-243.
- RAUNET M., 1982 - Reconnaissance morphologique dans la plaine de la Livouba (Vallée du Niari). Recherche d'un périmètre arachidier. Ministère de l'industrie et des mines de la Rép. Pop. du Congo, Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (IRAT), 54 p. + 9 p. annexes.
- RIOU C., 1975 - La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Mémoire ORSTOM, n°80, Paris.
- RITCHIE G.S.P., 1989 - The chemical behaviour of aluminium, hydrogen and manganese in acid soils. *In Soil acidity and plant growth*. Edited by A.D. ROBSON, *Soil Sci. and Plant Nutr. School of Agric., Univ. of Western Australia*, Academic Press, pp 1-60.
- ROBERT M., TESSIER D., 1974 - Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques. *Ann. agron.*, 25(6):859-882.
- ROBERT M., VENEAU G., HERVIO M., 1983 - Influence des polycations du fer et de l'aluminium sur les propriétés des argiles. *Science du Sol, Bull. AFES* (3-4):235-250.
- ROBSON A.D., 1989 (editor) - Soil acidity and plant growth. Academic Press, Australia, 306 p.
- ROBSON A.D., ABBOTT L.K., 1989 - The effect of soil acidity on microbial activity in soils. *In Soil acidity and plant growth*. A. D. Robson (editor), *Soil Sci. and Plant Nutr., School of Agriculture, Univ. of Western Australia*. Academic Press, pp 139-203.
- ROUILLER J., GUILLET B., BRUCKERT S., 1980 - Cations acides échangeables et acidités de surface : approche analytique et incidences pédogénétiques. *Science du sol, Bull. AFES*, (2):161-175.
- RPF, 1992 - Référentiel pédologique français. Collection Publications de l'INRA.
- SAKURAI K., OHDATE Y., KYUMA K., 1988 - Comparison of salt titration and potentiometric titration methods for the determination of zero point of charge (ZPC). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 34(2):171-182.
- SAMBA-KIMBATA M.J., 1978 - Le climat du Bas-Congo. Thèse 3^e cycle, Univ. de Dijon, tome 1, 280 p.

- SANCHEZ P.A., 1976 - Properties and management of soils in the tropics. Wiley Interscience Publication, 618 p.
- SANCHEZ P.A., PALM C.A., SZOTT L.T., CUEVAS E., LAL R., 1989 - Organic input management in tropical agroecosystems. *In* Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems, edited by D. Coleman, J.M. Oades and G. Uehara, NIFTAL Projet, Univ. of Hawaiï.
- SANCHEZ P.A., SMYTH T.J., 1987 - The IBSRAM acid tropical network : a progress report. *In* IBSRAM (1987), AFRICALAND, pp 19-40.
- SAUTTER G., 1966 - De l'Atlantique au fleuve Congo, une géographie de sous-peuplement. République du Congo, république gabonaise. Ed. Mouton & Co., Paris. «La plaine du Niari», pp 584-714.
- SCHOFIELD R.K., 1949 - The electric charges on clay particles. *J. Soil Sci.*, 1:1-8.
- SCHOFIELD R.K., TAYLOR A.W., 1955 - The measurement of soil pH. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 19:164-167.
- SCHULTHESS C.P., SPARKS D.L., 1986 - Back titration technique for proton isotherm modelling of oxides surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1406-1411.
- SCHWARTZ D., 1988 - Histoire d'un paysage : le Lousséké. Paléoenvironnement quaternaires et podzolisation sur sables Batéké. Quarante derniers millénaires, région de Brazzaville, R.P. du Congo. Collection Etudes et thèses, Editions de l'ORSTOM, Paris, 286 p., 6 pl. fotogr.
- SCHWARTZ D., 1991- La couverture pédologique de l'Afrique centrale atlantique. *In* R. Lanfranchi et D. Schwartz (eds) - Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. Coll. Didactiques, Edition ORSTOM, pp 52-59.
- SCHWERTMANN U., HERBILLON A.J., 1992 - Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils. *In* Myths and Science of soil of the tropics. Soil Sci. Soc. of America and American Soc. of Agronomy, special Publication n°29, pp 47-59.
- SCOTT B.J., CULLIS B.R., 1992 - Subterranean clover pasture responses to lime application on the acid soils of southern New South Wales. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 32:1051-1059.

- SCOTT B.J., FISHER J.A., 1989 - Selection of genotypes tolerant of aluminium and manganese. *In Soil acidity and plant growth*. Edited by A.D. ROBSON, *Soil Sci. and Plant Nutr. School of Agric., Univ. of Western Australia*, Academic Press, pp 167-203.
- SEGALEN P., 1969 - Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxydes de la zone intertropicale : sols jaunes et sols rouges. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, VII(2):225-256.
- SHOEMAKER H.E., MACLEAN E.O., PRATT P.F., 1961 - Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25:274-277.
- SINGH R., SINGH D.V., 1985 - Effectiveness of liming materials, their doses and fineness on some physicochemical properties of acid soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 33:218-220.
- SOIL SURVEY STAFF, 1975 - Soil Taxonomy. A basic system of soil classification. Agric. Handbook n. 436, 754 p.
- SPARKS D.L., 1984 - Ions actives : a historical and theoretical overview. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:514-518.
- SPOSITO G., 1981 - The operational definition of the zero point of charge in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:292-297.
- SPOSITO G., 1983 - On the measurement of permanent charge in Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47(5):1058-1059.
- SPOSITO G., 1984 - The future of an illusion : ion activities in soil solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48(3):531-536.
- SSSA, 1987 - Glossary of soil science terms. Soil Science Society of America, Madison, 33 p.
- STOOP W.A., 1980 - Ion adsorption mechanisms in oxidic soils : implications for point of zero charge determination. *Geoderma*, 23:303-314.
- STSC, 1991 - Statgraphics version 5, Statistical graphics system. User's manual, by Statistical Graphics Corporation, STSC, Inc., USA.
- SUMNER M.E., SHAHANDEH H., BOUTON J., HAMMEL J., 1986 - Amelioration of an acid soil profile through deep liming and surface application of gypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50(5):1254-1258.

- SUMNER M.E., FARINA P., HURST V.J., 1978 - Magnesium fixation : a possible cause of negative yield responses to lime application. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.* 9(10):995-1007.
- SUMNER M.E., FEY M.V., NOBLE A.D., 1991 - Nutrient status and toxicity problems in acid soils. In Soil acidity. ULRICH B and SUMNER (eds), chapter 7, pp 149-182.
- TAN K., KELTJENS W.G., FINDENEGG G.R., 1993 a - Aluminium toxicity in sorghum genotypes as influenced by solution acidity. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 39(2):291-298.
- TAN K., KELTJENS W.G., FINDENEGG G.R., 1993 b - Evaluating the contribution of magnesium deficiency in the aluminium toxicity syndrome in twelve sorghum genotypes. *Plant and Soil*, 149:255-261.
- TAN K.H., 1993 - Principles of soil chemistry. Second edition. Marcel Dekker Inc., New York, 362 p.
- TATE K.R., THENG B.K.G., 1980 - Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In THENG B.K.G. (editor) - Soils with variable charge. New Zealand Society of Soil Science, pp 225-249.
- TESSENS E., ZAUYAH S., 1982 - Positive permanent charge in oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1103-1105.
- TESSIER D., PEDRO G., 1976 - Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. Evolution des principales argiles Ca au cours du phénomène de retrait *Science du Sol, Bull. AFES (2):85-100.*
- TESSIER D., PEDRO G., 1984 - Recherches sur le rôle des minéraux argileux dans l'organisation et le comportement des sols. In Livre jubilaire de l'AFES, pp 223-233.
- THOMAS G.W., 1977 - Historical developments in soil chemistry : ion exchange. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41(2):230-237.
- TOUTOU-MISSIE E.G., 1985 - Impact de la mécanisation agricole sur les sols de la région de la Bouenza : cas particulier du Complexe Agro-industriel d'Etat de Mantsoumba (CAIEM). Mémoire d'Ingénieur de Développement Rural, IDR, UMNG, Brazzaville, 105 p., annexes.
- TUCKER B.M., 1954 - The determination of exchangeable calcium and magnesium in carbonate soils. *Aust. J. Agric. Res.*, 5:706-715.

- UDO E.J., UZU F.O., 1972 - Characteristics of phosphorus adsorption by some nigerian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 36:880-883.
- UEHARA G., GILLMAN G.P., 1980 - Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals : I. Experimental. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 44(2):250-252.
- UEHARA G., GILLMAN G.P., 1981 - The mineralogy, chemistry, and physics of variable charge clays. Westview Tropical Agricultural Series, No 4, Donald L. Plucknett, series Editor, 170 p.
- ULRICH B., 1991 - A ecosystem approach to soil acidification. *In Soil acidity*. ULRICH and SUMNER (eds), chapter 3, pp 28-79.
- ULRICH B., SUMNER M.E.,(editors), 1991 - Soil acidity. Springer-Verlag, Berlin, 76 fig., 224 p.
- URIBE B.E., 1989 - Soil and plant methods used at the tropical soil laboratory, Yurimaguas. *In IBSRAM Technical Notes n°2* : 163-175.
- VAN BREEMEN N., 1991 - Soil acidification and alkalization. *In Soil acidity*, ULRICH and SUMNER (eds), chapter 1, pp 1-7.
- VAN BREEMEN N., MULDER J., DRISCOLL C.T., 1983 - Acidification and alkanization of soils. *Plant and Soil*, 75:283-308.
- VAN BREEMEN N., WIELMAKER W.G., 1974 - Buffer intensities and equilibrium pH of minerals and soils : I. The contribution of minerals and aqueous carbonate to pH buffering. II. Theoretical and actual pH of minerals and soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:55-66.
- VAN LIEROP W., 1990 - Soil pH and lime requirement determination. *In Soil testing and plant analysis*, third edition, WESTERMAN R.L. editor, Soil Sci. Soc. Am., Inc., Madison, 73-126.
- VAN RAIJ B., PEECH M., 1972 - Electrochemical properties of some oxisols and alfisols of the tropics. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36:587-593.
- VAN WAMBEKE A., 1992 - Soils of tropics : properties and appraisal. McGraw-Hill, Inc., 343 p.
- VARGAS H.O., BELLOTTI A.C., EL-SHARKAWY M., HERNANDEZ A.P., 1989 - Calcium extraction by *Phenacoccus herreni* : symptoms and effects on Cassava photosynthesis. *Cassava newsletter*, 13(1):8-10.

- VIAUX Ph., 1981 - Conservation des échantillons de sol en vue d'un dosage de l'azote minéral. *Science du Sol, Bull. AFES*, (1):73-88.
- WARFVINGE P., SVERDRUP H., 1989 - Modeling limestone dissolution in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53(1):44-51.
- WHITTEN M.G., MCLAY C.D.A., RITCHIE G.S.P., 1993 - Movement of lime in acidic subsoils. Grains Research and Development Corporation W.A., Australia.
- WILCZYNSKY A.W., RENGER M., JOZEFACIUK G., HAJNOS M., 1992 - Negative charge - pH dependence of organic matter of forest soil under influence of liming as determined from titration curves. *Z. Pflanzenemähr. Bodenk.*, 156:267-271.
- WRIGHT R.J., BALIGAR V.C., MURRMAN R.P. (editors), 1991 - Plant-soil interaction at low pH. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1104 p.

ANNEXES

A1 : Principales caractéristiques physico-chimiques des sols sous savane

Tableau A1-1 : sol sous savane de plateau de Mantsoumba (Vallée du Niari).

Horizons	Profondeur (cm)	Granulométrie (%)						C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	
		SG	SF	LG	LF	A	da			
A	0-8	9,1	20,4	7,6	24,7	38,2	0,99	42,5	2,4	
AB	8-33	8,4	13,7	6,5	19,2	52,2	1,31	18,9	1,2	
B ₂₁	33-70	3,6	15,2	7,1	29,4	44,7	1,33	3,3	0,8	
B ₂₂	70-150	2,3	7,3	7,1	10,1	73,2	1,34	4,0	0,9	
Horizons	CEC	Complexe d'échange						pH		
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mn ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	eau	KCl
A	7,58	4,19	0,69	0,12	0,08	1,18	0,08	0,03	5,0	4,2
AB	2,77	0,48	0,05	0,07	0,09	0,80	0,77	0,11	4,6	3,9
B ₂₁	2,38	0,17	0,02	0,03	0,06	0,74	0,45	0,07	4,7	4,0
B ₂₂	2,73	0,13	0,01	0,04	0,07	0,03	1,49	0,14	4,6	3,9

Tableau A1-2 : sol de PK 45 (plateau de Mbé-Batéké)

Horizons	Profondeur (cm)	Granulométrie (% sol sec)						C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	
		SG	SF	LG	LF	A	da			
A	0-10	34,3	54,6	1,2	1,0	8,9	1,28	19,4	1,6	
BA	10-30	34,2	54,7	1,3	1,7	8,1	1,35	9,2	0,5	
B ₂₁	30-65	34,0	53,9	1,4	3,6	7,1	1,45	5,2	0,2	
B ₂₂	65-120	32,2	57,0	3,0	3,9	3,9	1,35	4,6	0,2	
Horizons	CEC	Complexe d'échange						pH		
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mn ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	eau	KCl
A	0,91	0,19	0,08	0,04	0,04	0,00	0,42	0,06	4,6	4,2
BA	0,42	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,36	0,04	4,7	4,8
B ₂₁	0,29	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,20	0,02	4,8	5,0
B ₂₂	0,27	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,15	0,02	4,8	5,0

Tableau A2-1 : sol après 17 années de culture intensive de manioc sur le plateau de Mantsoumba (Vallée du Niari).

Horizons	Profondeur (cm)	Granulométrie (%)				A	da	C	N
		SG	SF	LG	LF				
A _{p1}	0-10	3,4	10,3	7,5	14,0	59,8	1,20	18,0	1,3
A _{p2}	10-20	3,3	8,3	7,8	12,5	55,6	1,42	17,1	1,0
AB	20-30	3,1	10,0	8,1	13,5	61,9	1,31	10,5	1,0
B ₂₁	30-70	2,3	7,3	7,2	11,1	72,1	1,33	7,7	0,7

Horizons	Complexe d'échange							pH		
	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mn ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	eau	KCl
A _{p1}	4,61	1,98	0,69	0,12	0,08	1,18	1,07	0,03	4,4	3,9
A _{p2}	4,54	2,38	0,05	0,07	0,09	0,80	0,88	0,11	4,4	4,0
AB	2,66	0,24	0,02	0,03	0,06	0,74	1,66	0,07	4,7	4,0
B ₂₁	2,73	0,15	0,01	0,04	0,07	0,03	1,51	0,14	4,7	4,0

A 5 : Bilan des éléments apportés

Tableau A 5-1 : Bilan du calcium

Traitements		éq. app.	Δ_{lix}		$\Delta_{\text{éch}}$		Immo	
N i a r i	2t	3,03	0,17	5,6	2,58	85,1	0,28	9,2
	4t	6,07	0,37	6,1	4,22	69,5	1,48	24,4
	MV	1,39	0,05	3,6	0,23	16,5	1,11	79,9
	2tMV	4,42	0,43	9,7	3,02	68,3	0,97	21,9
	4tMV	7,46	0,57	7,6	4,80	64,3	2,09	28,0
M b é B a t t é k é	2t	3,03	0,16	5,3	1,81	59,7	1,06	34,9
	4t	6,07	0,30	4,9	3,89	64,0	1,88	31,0
	MV	1,39	0,02	1,4	0,21	15,1	1,16	83,5
	2tMV	4,42	0,15	3,4	2,13	48,2	2,14	48,4
	4tMV	7,46	0,32	4,3	4,33	58,0	2,81	37,7

Tableau A 5-2 : Bilan du magnésium

Traitements		éq.app.	Δ_{lix}		$\Delta_{\text{éch}}$		Immo	
N i a r i	2t	0,17	0,01	5,9	0,10	58,8	0,06	35,3
	4t	0,34	0,01	2,9	0,10	29,4	0,23	67,6
	MV	0,10	0,02	20,0	0,06	60,0	0,02	20,0
	2tMV	0,27	0,04	14,8	0,16	59,3	0,07	25,9
	4tMV	0,44	0,03	6,8	0,18	40,9	0,23	52,3
M b é B a t t é k é	2t	0,17	0,09	52,9	0,02	11,8	0,06	35,3
	4t	0,34	0,13	38,2	0,04	11,8	0,17	50,0
	MV	0,10	0,06	60,0	0,02	20,0	0,02	20,0
	2tMV	0,27	0,17	63,0	0,03	11,1	0,07	25,9
	4tMV	0,44	0,22	50,0	0,03	6,8	0,19	43,2

Tableau A 5-3 : Bilan du potassium

Traitements		éq.app.	Δ_{lix}		$\Delta_{éch}$		Immo	
N i a r i	2t	0,0	-0,01	–	-0,01	–	0,02	–
	4t	0,0	-0,01	–	-0,01	–	0,02	–
	MV	0,14	0,04		0,11		-0,01	–
	2tMV	0,14	0,03	21,4	0,11	78,6	0,0	0,0
	4tMV	0,14	0,02	14,3	0,12	85,7	0,0	0,0
M b é B a t é k é	2t	0,0	0,01	–	0,01	–	-0,02	–
	4t	0,0	-0,01	–	-0,02	–	0,03	–
	MV	0,14	0,10	–	0,10	–	-0,06	–
	2tMV	0,14	0,08	–	0,10	–	-0,04	–
	4tMV		0,08	–	0,13	–	-0,07	–

éq. app. = équivalent apporté : expression en $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ de la composition du calcaire et du Pueraria apportés au sol.

Δ_{lix} = différence de la quantité d'élément lixiviée entre un traitement considéré et le sol témoin

$\Delta_{éch}$ = différence de la valeur du cation échangeable entre le traitement considéré et le témoin

Immo. = estimation de la fraction immobile par différence entre la quantité totale de l'élément apportée, la quantité susceptible d'être lixiviée et celle passant sous forme échangeable.

Tableau A 5-4 : Tableau général du bilan des éléments apportés

		Vallée du Niari				Plateau Mbé-Batéké					éq. apport
	lixivié	L	EchCo	E	I	lixivié	L	EchCo	E	I	
Calcium											
Témoin	0,22		2,48	2,26		0,05		0,26	0,21		
MV	0,27	0,05	2,71	0,18	1,16	0,07	0,02	0,46	0,18	1,19	1,39
2t	0,39	0,17	5,23	2,58	0,28	0,22	0,17	2,06	1,63	1,23	2,03
2tMV	0,65	0,43	5,50	2,59	1,40	0,22	0,17	2,38	1,95	2,30	4,42
4t	0,59	0,37	6,70	3,85	1,85	0,38	0,33	4,14	3,55	2,19	6,07
4tMV	0,79	0,57	7,28	4,23	2,66	0,40	0,35	4,58	3,97	3,14	7,46
Magnésium											
Témoin	0,05		0,30	0,25		0,03		0,12	0,09		
MV	0,07	0,02	0,38	0,06	0,02	0,05	0,02	0,19	0,05	0,03	0,10
2t	0,06	0,01	0,41	0,10	0,06	0,05	0,02	0,21	0,07	0,08	0,17
2tMV	0,09	0,04	0,50	0,16	0,07	0,06	0,03	0,29	0,14	0,10	0,27
4t	0,06	0,01	0,41	0,10	0,23	0,06	0,03	0,25	0,10	0,21	0,34
4tMV	0,08	0,03	0,51	0,18	0,23	0,07	0,04	0,34	0,18	0,22	0,44
Potassium											
Témoin	0,03		0,06	0,03		0,04		0,05	0,01		
MV	0,07	0,04	0,21	0,11	-0,01	0,14	0,10	0,16	0,01	0,03	0,14
2t	0,02	0,02	0,05	0,00	-0,02	0,03	-0,01	0,07	0,03	-0,02	0,00
2tMV	0,06	0,03	0,20	0,11	0,00	0,12	0,08	0,16	0,03	0,03	0,14
4t	0,02	-0,01	0,05	0,00	0,01	0,03	-0,01	0,04	0,00	0,01	0,00
4tMV	0,05	0,02	0,20	0,12	0,00	0,12	0,08	0,19	0,06	0,00	0,14
Sodium											
Témoin	0,16		0,06	-0,10		0,18		0,06	-0,12		
MV	0,16	0,00	0,06	0,00		0,18	0,00	0,06	0,00		
2t	0,09	-0,07	0,06	-0,13		0,12	-0,06	0,07	0,07		
2tMV	0,11	-0,05	0,07	0,06		0,13	-0,05	0,07	0,06		
4t	0,09	-0,07	0,06	0,07		0,09	-0,09	0,06	0,09		
4tMV	0,09	-0,07	0,05	0,06		0,10	-0,08	0,06	0,08		
Somme											
Témoin	0,46		2,90	2,44		0,29		0,49	0,20		
MV	0,57	0,11	3,37	0,36		0,44	0,15	0,87	0,23		
2t	0,56	0,10	5,76	2,76		0,41	0,12	2,40	1,79		
2tMV	0,90	0,44	6,27	2,93		0,53	0,24	2,90	2,17		
4t	0,76	0,30	7,23	4,03		0,55	0,26	4,50	3,75		
4tMV	1,01	0,55	8,04	4,59		0,69	0,40	5,18	4,29		

TABLES



ABREVIATIONS

AGRISUD : Institut de recherche pour l'appui au développement agricole en zones tropicales.

CAIEM : Complexe Agro-industriel d'Etat de Mantsoumba

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

FAC : Fonds d'Aide et de Coopération (Ministère Français de la Coopération)

FAO : Food and Agriculture Organization of United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture).

IBSRAM : International Board for Soil Research and management.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.

LCSC : Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés, Centre ORSTOM de Montpellier.

ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération.

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1-1 : Distribution des sols acides dans le monde (WRIGHT *et al.*, 1991).

Figure 1.1-2 : Distribution des sols à argiles 1:1 prédominantes en Afrique (VAN WAMBEKE (1991), d'après les données FAO-UNESCO, 1977).

Figure 1.1-3 : Influence du pH sur la disponibilité des éléments nutritifs (MENGEL et KIRKBY, 1978; CALLOT *et al.*, 1982; CHAMAYOU et LEGROS, 1989).

Figure 1.2-1 : Cartes de situation

Figure 1.2-2 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен pour les deux sites d'étude (d'après données ORSTOM et Service de météorologie Nationale).

Figure 1.2-3 : Bilan P-ETP-RU à Brazzaville, avec une réserve utile fixée arbitrairement à 150 mm (SCHWARTZ, 1988 d'après les données de RIOU, 1975).

Figure 1.2-4 : coupe schématique du synclinal schisto-calcaire (d'après BOCQUIER et GUILLEMIN, 1959).

Figure 1.2-5 : coupe schématique à travers le plateau de Mbé-Batéké montrant les positions relatives des différentes formations (d'après LE MARECHAL, 1966).

Chapitre 2

Figure 2.2-1 : Schéma du prélèvement des échantillons de sol (dimensionnement utilisé à Mantsoumba).

Figure 2.3-2 : Correspondance des horizons sous savane et sous culture de manioc à Mantsoumba (Vallée du Niari) et au PK 45 (plateau de Mbé-Batéké).

Figure 2.4-1 : Résumé comparatif des principales caractéristiques du sol de Mantsoumba et du PK 45.

Figure 2.4-2 : Modification de la granulométrie de la terre fine à Mantsoumba (Vallée du Niari)

après 15 années de culture mécanisée intensive de manioc.

Figure 2.4-3 : Variation des teneurs en carbone total dans les sols sous savane et sous culture.

Figure 2.4-4 : Disponibilité comparée du phosphore labile **OLSEN-DABIN** entre savane et culture dans la Vallée du Niari et sur le plateau de Mbé-Batéké.

Figure 2.4-5 : Modifications du pH du sol par la mise en culture et les apports de calcaire selon les situations étudiées.

Figure 2.4-6 : Effets de la mise en culture et des différentes modalités sur le complexe d'échange.

Figure 2.4-7 : Effets de la mise en culture et des différentes modalités sur le calcium et l'aluminium échangeables

Figure 2.4-8 : Profils de pH comparés, pour différents apports de calcaire broyé, entre la ligne et l'interligne (IL).

Chapitre 3

Figure 3.2-1 : Illustration de quelques réactions conduisant à la modification de la charge de surface (d'après PARKS et De BRUYN, 1962 ; VAN RAIJ et PEECH, 1972 ; UEHARA et GILLMAN, 1981).

Figure 3.2-2 : Mode de construction des courbes et détermination des valeurs caractéristiques.

Figure 3.2-3 : Quelques courbes de titrage potentiométrique des horizons des sols sous culture (NC0) de la Vallée du Niari et du sol sous savane du plateau de Mbé-Batéké (BS).

Figure 3.2-6 : Courbes d'adsorption cationique et anionique en fonction du pH de deux horizons de surface et de profondeur des sols de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Chapitre 4

Figure 4.1-1 : Détermination des doses d'amendement : pH théorique, pH mesuré sur les blancs de contact et sur les suspensions du sol en fonction des apports de H^+ ou OH^- .

Figure 4.3-1 : Interactions entre les particules de calcaire, le complexe d'échange et la solution du sol (d'après WARFVINGE et SVERDRUP, 1989).

Figure 4.3-2 : Garniture cationique (en proportion relative) du complexe d'échange des sols du Niari et de Mbé-Batéké après trois semaines

Figure 4.3-3 : Evolution de la CEC et des teneurs en cations majeurs échangeables des sols du Niari et du plateau de Mbé, au cours de l'incubation

Chapitre 5

Figure 5.1-1 : Evolution du pH des percolats des sols de la Vallée du Niari et du Plateau de Mbé

Figure 5.1-2 : Bilan du calcium et du magnésium apporté au sol

Figure 5.2-1 : Schéma de principe de la cellule d'électrodialyse utilisée.

Figure 5.2-2 : Quantités de cations séparées (compartiment C2) pour les quatre traitements en fonction de la quantité d'électricité ayant traversé le dispositif.

Figure 5.4-1 : Cations échangeables et séparation par électrodialyse, en relation avec les notions de quantité, intensité et absorption par la plante (d'après schéma d'origine de MENGEL et KIRKBY, 1982).

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau 1.1-1 : Qualificatifs de l'acidité du sol selon les systèmes américain (SSSA, 1987) et français (Référentiel Pédologique, 1992).

Chapitre 2

Tableau 2.4-1 : Profils comparés de pH_{eau} et de $(\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{eau})$ entre l'apport localisé et l'interligne (IL) dans la Vallée du Niari (NC20) et sur le plateau de Mbé-Batéké (B19 et B09).

Chapitre 3

Tableau 3.1-1 : Minéralogie comparée des deux types de sol de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Tableau 3.1-2 : Oxydes libres (en $g\ kg^{-1}$) dans les sols sous savane (Plateau de Mbé-Batéké : BS, Vallée du Niari : NS) et sous culture de la Vallée du Niari (NC0).

Tableau 3.2-1 : Protocole de préparation des solutions pour l'étude des charges variables dans le sol.

Tableau 3.2-2 : Accroissement moyen de la charge variable nette du sol entre pH 4,5 et 6,0 ($\Delta\sigma_v$ en $cmol / unité\ pH$)

Tableau 3.2-3 : Point de charge nulle (pH_0), point de titrage nul (PTN) et charge variable nette (σ_v) pour trois profils de sol de la Vallée du Niari et du plateau de Mbé-Batéké.

Tableau 3.2-4 : Charges permanentes par mesure de l'absorption à partir d'une solution de $CaCl_2\ 0,002\ M$.

Tableau 3.2-5 : Valeurs de pH d'équilibre, de CEC totale (charges variables + permanentes, mesurées dans $CaCl_2\ 0,002\ M$), de CEC mesurée par la méthode à la cobaltihexamine et de CEC mesurée par adsorption d'ions.

Chapitre 4

Tableau 4.1-1 : Effet de l'acidité sur quelques réactions des éléments importants du sol pour la nutrition des plantes (d'après SUMNER *et al.* 1991).

Tableau 4.1-2 : Protocole de préparation des solutions d'équilibre pour l'étude du pouvoir tampon des sols.

Tableau 4.1-3 : Correspondance entre apports de OH^- et doses théoriques d'amendements.

Tableau 4.1-4 : Récapitulatif des doses théoriques d'amendement, pH théorique et pH obtenus sur le sol du Niari au cours de l'essai préliminaire.

Tableau 4.2-1 : Solubilisation comparée du calcium et du magnésium par différentes solutions testées, sur le calcaire pur de laboratoire et le calcaire broyé de Madingou.

Tableau 4.2-2 : Capacités d'échange cationique mesurées par différents électrolytes et comparées avec et sans apport de calcaire broyé.

Tableau 4.2-3 : Cations échangeables déterminés par les différents électrolytes.

Tableau 4.3-1 : Effets des différents traitements sur le pH_{eau} du sol du Niari au cours de l'incubation.

Tableau 4.3-1 : Finesse des calcaires et dolomies broyés selon les normes NFU 440 (BOYER, 1978).

Tableau 4.3-2 : Composition chimique du calcaire broyé de Madingou (en g kg^{-1}).

Tableau 4.3-2 : Effets des différents traitements sur le pH_{eau} du sol de Mbé au cours de l'incubation.

Tableau 4.3-3 : Composition chimique totale du *Pueraria javanica* (en g kg^{-1} de matière sèche).

Tableau 4.3-3 : Effets des différents traitements sur le pH_{KCl} du sol du Niari au cours de l'incubation.

Tableau 4.3-4 : Effets des différents traitements sur le pH_{KCl} du sol de Mbé au cours de l'incubation.

Tableau 4.3-5 : Effets des différents traitements sur l'évolution du ΔpH du sol du Niari au cours de l'incubation.

Tableau 4.3-6 : Effets des différents traitements sur l'évolution du ΔpH du sol de Mbé au cours de l'incubation.

Chapitre 5

Tableau 5.1-1 : Quantités cumulées des cations et anions lixiviés

Tableau 5.1-2 : Quantités cumulées des cations et anions lixiviés

Tableau 5.2-1 : Quantités séparées par électrodialyse des trois éléments majeurs du sol après passage de 200 coulombs dans la cellule.

Tableau 5.3-1 : Poids secs (en grammes) des parties aériennes et des racines du *Lolium multiflorum* obtenus en fonction du traitement reçu par le sol de la Vallée du Niari.

Tableau 5.3-2 : Influence de l'apport de calcaire broyé de Madingou et/ou de *Pueraria* sur la composition en minéraux du *Lolium multiflorum*.

Tableau 5.3-3 : Influence de l'apport de calcaire broyé de Madingou et/ou de *Pueraria* sur les exportations des éléments minéraux par le *Lolium multiflorum*.

Tableau 5.4-1 : Cations échangeables (CE), éléments séparés par électrodialyse (ED), prélèvements totaux par la plante (PP) dans le sol du Niari incubé pendant trois semaines.

Planches photographiques

Chapitre 2

Photo 1 - Vallée du Niari : vue des essais «Chaulage» à droite et «Systèmes de culture» à gauche

Photo 2 - Plateau de Mbé-Batéké : site d'essai AGRISUD au PK 45, avec, au fond, bananiers et brise-vents d'*Eucalyptus sp*

Photo 3 - Vallée du Niari : profil de sol sous savane, plateau de Mantsoumba.

Photo 4 - Plateau de Mbé-Batéké : profil de sol sous savane, PK 45, site d'essai AGRISUD

Photo 5 - Vallée du Niari, plateau de Mantsoumba : culture de manioc âgée de six mois, jouxtant une jachère à *Pueraria javanica*

Photo 6 - Vallée du Niari, plateau de Mantsoumba : jeune plantation de manioc envahie par le *Pueraria*, parcelle n°14 ; au fond, la savane à *Hyparrhenia diplandra*

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....	3
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION.....	6
1.	
LES SOLS ACIDES DU CONGO ET LES PROBLEMES QU'ILS POSENT	10
1.1. L'ACIDITE DES SOLS.....	12
1.1.1. DISTRIBUTION ET ORIGINE.....	12
1.1.2. TYPES D'ACIDITE ET MESURE.....	15
1.1.3. INCIDENCES AGRONOMIQUES	18
1.2. LES SOLS ACIDES DU CONGO	22
1.2.1. LES CADRES NATURELS DE L'ETUDE.....	24
1.2.1.1. Situation géographique	24
1.2.1.2. Climat.....	24
1.2.1.3. Géologie et géomorphologie.....	27
1.2.1.4. Végétation.....	30
1.2.1.5. Sols retenus : position du problème	31
1.2.2. APERÇU HISTORIQUE DE LA MISE EN CULTURE MECANISEE ET DES RECHERCHES SUR LES SOLS ACIDES DU CONGO.....	32
1.2.2.1. Avant 1949.....	32
1.2.2.2. La période 1949-1964	34
1.2.2.3. A partir de 1964.....	35

2.

MODIFICATIONS DE L'ETAT DES SOLS DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU DE MBE-BATEKE PAR SUITE DE LA MISE EN CULTURE MECANISEE

40

2.1. LOCALISATION ET CHOIX DES SITUATIONS ETUDIEES	41
2.1.1. DANS LA VALLEE DU NIARI	42
2.1.2. SUR LE PLATEAU DE MBE-BATEKE	44
2.2. METHODES D'OBSERVATION, DE PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS ET D'ANALYSE UTILISEES	44
2.2.1. MORPHOLOGIE DES SOLS.....	44
2.2.2. PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS	44
2.2.3. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES	46
2.3. MODIFICATIONS DE LA MORPHOLOGIE DES SOLS	48
2.3.1. SOL DE LA VALLEE DU NIARI	48
2.3.1.1. sous savane	48
2.3.1.2. sous culture.....	52
2.3.2. SOL DU PLATEAU DE MBE-BATEKE.....	52
2.3.2.1. sous savane	52
2.3.2.2. sous culture.....	53
2.4. MODIFICATION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS	55
2.4.1. CARACTERISATION DES SOLS SOUS SAVANE	55
2.4.1.1. Caractéristiques physiques.....	55
2.4.1.2. Caractéristiques physico-chimiques	57
2.4.1.2.1. Matière organique.....	57
2.4.1.2.2. Acidité.....	57
2.4.1.2.3. Capacité d'échange et cations échangeables.....	58
2.4.2. EVOLUTION DES SOLS SOUS CULTURE DE MANIOC.....	60

2.4.2.1. Granulométrie	60
2.4.2.2. Matière organique et phosphore	60
2.4.2.2.1. Matière organique.....	62
2.4.2.2.2. Phosphore labile.....	62
2.4.2.3. Acidité du sol	65
2.4.2.4. Complexe adsorbant.....	67
2.4.2.4.1. Capacité d'échange cationique	67
2.4.2.4.2. Cations	67
2.4.2.4.3. Taux de saturation	70
2.4.2.5. Hétérogénéité des effets du calcaire sur le pH.....	70
2.5. DISCUSSION : LES GRANDS AXES DE LA RECHERCHE EFFECTUEE.....	73

3.

REACTIVITE DU COMPLEXE D'ECHANGE DES SOLS FERRALLITIQUES DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU DE MBE-BATEKE..... 77

3.1. CONSTITUANTS MINERAUX.....	78
3.1.1. MATERIELS ET METHODES	78
3.1.1.1. Echantillons de sols	78
3.1.1.2. Obtention de la fraction argileuse et identification des minéraux	79
3.1.1.3. Méthode d'analyse des oxydes libres	79
3.1.2. RESULTATS ET DISCUSSION	80
3.1.2.1. Minéralogie de la fraction fine	80
3.1.2.2. Teneurs en oxydes libres.....	82
3.2. CHARGES DE SURFACE.....	85
3.2.1. RAPPELS SUR L'ORIGINE DES CHARGES VARIABLES DU SOL.....	85
3.2.2. PRESENTATION DES METHODES ET PARAMETRES UTILISES POUR L'ETUDE DES CHARGES DE SURFACE.....	88
3.2.2.1. Titrage potentiométrique.....	88
3.2.2.1.1. Points remarquables	89
3.2.2.1.2. Charge variable et charge permanente	90

3.2.2.2. Adsorption d'ions	91
3.2.3. APPLICATION AUX SOLS DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU DE MBE-BATEKE....	91
3.2.3.1. Matériels et méthodes.....	92
3.2.3.1.1. Echantillons de sols	92
3.2.3.1.2. Mode opératoire pour la titrimétrie	92
3.2.3.1.3. Mode opératoire pour l'adsorption d'ions	93
3.2.3.2. Evolution de la charge variable nette.....	94
3.2.3.3. pH ₀	97
3.2.3.4. Charge variable nette	99
3.2.3.5. Charge permanente	99
3.2.3.6. Evolution des capacités d'échange anionique (CEA) et cationique (CEC).....	103
3.2.3.6.1. Capacité d'échange cationique basique.....	103
3.2.3.6.2. Capacité d'échange cationique totale.....	105
3.2.3.6.3. Capacité d'échange anionique	106
3.2.3.7. Discussion et conclusion : comparaison des méthodes d'étude des charges du sol utilisées.....	107

4.

INFLUENCE DES APPORTS DE CALCAIRE BROYE ET DE *Pueraria* SUR LA REACTION ET LE COMPLEXE D'ÉCHANGE DES SOLS DE LA VALLEE DU NIARI ET DU PLATEAU DE MBE-BATEKE..... 113

4.1. CORRECTION DE L'ACIDITE PAR DES AMENDEMENTS CALCAIRES	115
4.1.1. NECESSITE DE CORRECTION DE L'ACIDITE.....	115
4.1.2. DETERMINATION DES DOSES : INSUFFISANCE DES CRITERES HABITUELS	117
4.1.3. UTILISATION D'UNE METHODE BASEE SUR LE POUVOIR TAMPON DU SOL	120
4.1.3.1. Mode opératoire pour l'étude du pouvoir tampon des sols	121
4.1.3.2. Résultats et discussion.....	122
4.1.3.2.1. Pouvoir tampon du sol.....	122
4.1.3.2.2. Doses théoriques de calcaire.....	124
4.1.4. ESSAI PRELIMINAIRE : VALIDATION DES DOSES THEORIQUES DE CALCAIRE BROYE.....	125
4.1.4.1. Matériels et méthodes.....	125
4.1.4.2. Résultats et discussion.....	125

4.2. RECHERCHE D'UNE METHODE DE DETERMINATION DES CATIONS ECHANGEABLES DANS UN SOL ACIDE APRES APPORT DE CALCAIRE	129
4.2.1. POSITION DU PROBLEME	129
4.2.2. MATERIELS ET METHODES	130
4.2.2.1. Echantillons utilisés	130
4.2.2.2. Solutions d'extraction	130
4.2.2.3. Mode opératoire général	131
4.2.2.4. Méthode à la cobalthexamine.....	132
4.2.3. RESULTATS ET DISCUSSION	132
4.2.3.1. Solubilisation du calcium et du magnésium des carbonates	132
4.2.3.2. Capacité d'échange cationique du sol.....	134
4.2.3.3. Cations échangeables	135
4.2.4. JUSTIFICATION DU CHOIX DE LA METHODE.....	136
4.3. EFFETS DE DOSES CROISSANTES DE CALCAIRE BROYE ET/OU DU <i>Pueraria javanica</i> SUR LE COMPLEXE D'ECHANGE.....	138
4.3.1. CARACTERISATION DES PRODUITS UTILISES.....	139
4.3.1.1. Calcaire broyé de Madingou	139
4.3.1.2. Matière végétale enfouie	141
4.3.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	142
4.3.2.1. Procédure utilisée	142
4.3.2.2. Paramètres étudiés et méthodes d'analyse	144
4.3.3. RESULTATS	144
4.3.3.1. Carbonates résiduels et carbone organique.....	144
4.3.3.2. Effets du calcaire et du <i>Pueraria</i> sur la réaction du sol.....	145
4.3.3.2.1. pHeau.....	145
4.3.3.2.2. pHKCl.....	149
4.3.3.2.3. Δ pH	149
4.3.3.3. Effets sur le complexe d'échange	149
4.3.3.3.1. Capacité d'échange cationique	150
4.3.3.3.2. Cations échangeables	150
4.3.3.3.2.1. sol de la Vallée du Niari.....	150
4.3.3.3.2.2. sol du plateau de Mbé.....	154

4.3.3.4. Discussion et conclusion	155
---	-----

5.

MODIFICATIONS DE LA DYNAMIQUE D'ÉCHANGE D'IONS PAR LA CORRECTION DE L'ACIDITÉ	157
--	------------

5.1. ESSAI D'APPRECIATION DES PERTES PAR LIXIVIATION	160
---	------------

5.1.1. CONDUITE DE L'ESSAI	160
----------------------------------	-----

5.1.1.1. Protocole expérimental	160
---------------------------------------	-----

5.1.1.2. Analyses	161
-------------------------	-----

5.1.2. RESULTATS	162
------------------------	-----

5.1.2.1. pH des percolats	162
---------------------------------	-----

5.1.2.2. Quantités de cations lixiviés	163
--	-----

5.1.2.2.1. Calcium	163
--------------------------	-----

5.1.2.2.2. Magnésium	165
----------------------------	-----

5.1.2.2.3. Potassium	165
----------------------------	-----

5.1.2.2.4. Sodium	165
-------------------------	-----

5.1.2.2.5. Aluminium et manganèse	165
---	-----

5.1.2.3. Quantités d'anions lixiviés	166
--	-----

5.1.2.3.1. Nitrates	166
---------------------------	-----

5.1.2.3.2. Chlorures	166
----------------------------	-----

5.1.2.3.3. Sulfates	166
---------------------------	-----

5.1.2.4. Balance ionique des percolats	167
--	-----

5.1.3. DEVENIR DES ELEMENTS APPORTES : ESSAI DE BILAN	167
---	-----

5.2. SEPARATION DES ELEMENTS DU SOL PAR ELECTRODIALYSE	172
---	------------

5.2.1. MATERIELS ET METHODES	172
------------------------------------	-----

5.2.1.1. Echantillons de sol	172
------------------------------------	-----

5.2.1.2. Technique de l'électrodialyse	173
--	-----

5.2.1.3. Traitement des données	174
---------------------------------------	-----

5.2.2. RESULTATS ET DISCUSSION	174
--------------------------------------	-----

5.3. PRELEVEMENT DES ELEMENTS MINERAUX PAR UNE PLANTE-TEST	178
---	------------

5.3.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	178
5.3.2. METHODES D'ANALYSE.....	179
5.3.2.1. Biomasse.....	179
5.3.2.2. Analyses chimiques.....	179
5.3.3. RESULTATS	180
5.3.3.1. Biomasse produite.....	180
5.3.3.2. Composition minérale de la plante.....	181
5.3.3.3. Exportations des éléments minéraux par la plante.....	183
5.4. APPRECIATION GENERALE DE LA DYNAMIQUE D'ECHANGE DES ELEMENTS MINERAUX	186

6.

SYNTHESE DES RESULTATS, CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET PERSPECTIVES..... 190

6.1. METHODOLOGIE ET PRINCIPAUX ACQUIS DES TRAVAUX REALISES	192
6.1.1. EVOLUTION DU SOL ET ACIDIFICATION	192
6.1.2. DEGRADATION DES SOLS SOUS CULTURE ET INTERET DE L'APPROCHE DE TERRAIN....	194
6.1.3. APPORTS DE LA CARACTERISATION DU COMPLEXE D'ECHANGE.....	195
6.1.3.1. Minéralogie	195
6.1.3.2. Propriétés d'échange d'ions.....	195
6.1.4. CORRECTION DE L'ACIDITE ET DYNAMIQUE D'ECHANGE D'IONS	197
6.1.4.1. Effets de l'apport de calcaire et/ou l'incorporation de <i>Pueraria javanica</i> sur le complexe d'échange.....	197
6.1.4.2. Pertes de éléments par lixiviation.....	198
6.1.4.3. Devenir des éléments apportés par les amendements.....	200
6.2. CONSEQUENCES AGRONOMIQUES ET PERSPECTIVES	203
6.2.1. CONSEQUENCES AGRONOMIQUES.....	203
6.2.2. PERSPECTIVES DE RECHERCHES.....	206

CONCLUSION.....	210
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	215
ANNEXES	237
TABLES	243
ABREVIATIONS.....	244
LISTE DES FIGURES	245
LISTE DES TABLEAUX	248
PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES	250
TABLE DES MATIERES	251

Les opinions exprimées dans ce document
n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs

Ce travail de recherche a été effectué au sein du Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés du centre de recherche Orstom de Montpellier sous la direction de Roland MOREAU, directeur de recherche, pour l'obtention par Mathurin-Yves DJONDO du doctorat de l'université Paris XII-Val de Marne, spécialité Science du sol, le 15 décembre 1994.