

INSTITUT DES SCIENCES AGRONOMIQUES DU BURUNDI

I.S.A.B.U.



**Programme Fertilité des Sols.**

Note Technique

**EXPLOITATION VIVRIERE ET FOURRAGERE  
DES SOLS ALLIQUES D'ALTITUDE DU BURUNDI.  
Contraintes spécifiques et premières recommandations.**

Luc OPDECAMP  
Jacques GOURDIN  
Christian OTOUL

TABLE DES MATIERES

Page:

RESUME.....	1
SUMMARY.....	2
INTRODUCTION.....	3
MATERIAUX ET METHODES.....	4
Incidence du caractère allique sur la production de manioc et patate douce.....	4
Simulations d'exploitations vivrières et fourragères.....	5
Evaluation économique.....	7
Evolution des propriétés du sol.....	8
RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	9
Incidence du caractère allique sur la production de manioc et patate douce.....	9
Simulations d'exploitations vivrières et fourragères.....	10
Evaluation économique.....	14
Evolution des propriétés du sol.....	15
DISCUSSION GENERALE.....	17
PREMIERES RECOMMANDATIONS.....	17
REMERCIEMENTS.....	18
LITTERATURE CITEE.....	19
ANNEXE I : Profil Nyagatika.....	21
ANNEXE II : NYAGATIKA : spécifications phytotechniques.....	23
ANNEXE III : BDAP/Tubercules/Kirimiro.....	29
ANNEXE IV : Bilans économiques.....	33
ANNEXES V : Evolution des propriétés du sol.....	37
ANNEXE VI : Consultation ACID 4/Nyagatika.....	39

## RESUME

L'incidence du caractère allique du sol (plus de 60 % d'Aluminium échangeable) sur le rendement de quatre cultivars de manioc et de quatre cultivars de patate douce est déterminée en milieu rural dans un réseau de 40 parcelles distribuées dans la région du Kirimiro. La production est réduite sur sol allique de manière significative pour trois cultivars de patate douce et pour un cultivar de manioc.

De plus, des simulations d'exploitation vivrière et fourragère de sol allique sont opérées à Gisozi avec diverses espèces durant une période de trois ans. Une exploitation traditionnelle est simulée en recourant à des ressources virtuelles en fumier, une exploitation monétarisée par le recours aux engrais minéraux et au chaulage, et une exploitation peu monétarisée combinant l'utilisation de chaux et de fumier. Aucun potentiel de diversification vivrière ou fourragère n'est détecté dans l'exploitation traditionnelle sur base des rendements obtenus et de l'analyse économique effectuée. Un potentiel de diversification en pomme de terre, blé et maïs est diagnostiqué dans les deux autres exploitations. Le chaulage des sols alliques apparaît comme indispensable pour soutenir une politique de diversification de leur exploitation vivrière et fourragère. L'indisponibilité réelle de fumier et les risques de déficiences PK induites par le chaulage exigent également l'application d'engrais minéraux.

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques du sol démontre l'inefficacité de l'écobuage en ouverture de prairie ainsi que celle de la fumure organique intensive en post-ouverture.

Le chaulage se révèle efficace mais ses effets restent limités à la partie superficielle du sol.

Des recommandations finales sont émises, préconisant l'ouverture des sols alliques par la pomme de terre ou la patate douce et l'instauration du crédit rural pour permettre les investissements en intrants minéraux.

## SUMMARY

The effect of the soil allic property (more than 60 % exchangeable Al) on the yield of four cassava varieties and four sweet potato varieties was determined through a network of 40 plots in the Kirimiro region. Yield was significantly reduced on allic soils for three sweet potato varieties and one cassava variety.

Furthermore, three farming systems were simulated on an allic soil with various food and fodder crops in Gisozi during a three years period. Traditional farming was simulated by using virtual manure resources, monetarized farming by resorting to lime and fertilizers, and low monetarized farming by combining the use of lime and manure. It appeared that traditional farming did not have any potential to diversify its food and fodder cropping pattern as yields remained too low to be profitable. For the two other farming systems there exists a potential to intensify using potato, wheat and corn.

Liming allic soils appears to be essential to support a policy of diversifying their land use with food and fodder crops. Actual unavailability of manure and PK deficiency hazards induced by lime make fertilizer use also essential.

Burning practices on allic grassland before the first cropping did not affect soil characteristics and intensive manuring later on remained ineffective as well. Liming was more efficient but its effects were limited to the top soil.

Finally, it is recommended to bring allic soils under cultivation with potato or sweet potato and to install rural credit to allow for investments in mineral inputs.

## INTRODUCTION

Les sols "alliques" sont caractérisés par une saturation effective en aluminium échangeable dépassant 60 %. Un risque élevé de toxicité aluminique ("per-alumino-toxicité") est alors diagnostiqué pour de nombreuses espèces vivrières et fourragères (OPDECAMP *et al.*, 1988). Pour être classifiés comme alliques, les sols doivent développer cette caractéristique sur une profondeur d'au moins 40 cm si le matériau parental est homogène et non rocheux (OPDECAMP, 1986). Il s'agit généralement de sols acides dont le pH (H<sub>2</sub>O) est inférieur à 5.0.

De tels sols couvrent d'énormes superficies en régions tropicales humides, où ils sont soumis à des modes d'exploitation spécifiques : couverts naturels forestiers ou graminéens utilisés par l'agriculture itinérante (shifting-cultivation) ou comme parcours pour le bétail ; plantations industrielles avec des espèces adaptées (thé et hévéa par exemple). Ce sont les graves contraintes de fertilité imposées par ces sols qui pourraient expliquer le caractère très extensif de leur utilisation vivrière ou fourragère actuelle.

L'agriculture itinérante dans les forêts tropicales humides s'appuie sur un chaulage et une fertilisation minérale indirects, par mise à feu de la biomasse forestière. Des quantités importantes d'éléments minéraux peuvent être ainsi libérées, dont SANCHEZ (1973) fournit un ordre de grandeur : 33 à 137 kg/ha de P, 600 à 1017 kg/ha de K, 653 à 2760 kg/ha de Ca et 331 à 3890 kg/ha de Mg dans des forêts du Zaïre, du Ghana, de Panama et de Puerto-Rico. La neutralisation de l'aluminium échangeable par brûlis forestier est cependant éphémère, environ 3 - 4 ans d'après des observations de SANCHEZ *et al.* (1983). Ceci est à l'origine du caractère itinérant de cette agriculture, puisque la chute de fertilité induite après cette période décide de l'abandon de l'exploitation du sol et du retour au recrû forestier. Le chaulage direct des sols alliques ne produit lui aussi que des effets temporaires, la vitesse de réacidification étant directement proportionnelle au tonnage appliqué (DOERGE et GARDNER, 1985).

Au Burundi, on ne pratique pas (plus) l'agriculture itinérante, les sols alliques d'altitude étant essentiellement exploités comme parcours pour le bétail (pseudo-zébus de race ANKOLE sur prairie à *Eragrostis olivacea*). Toutefois, la jachère longue est pratiquée sur sol allique, en bordure des parcours, où l'on cultive temporairement des plantes à tubercules (manioc, patate douce), en recourant localement à l'écobuage. De même, la plupart des parcelles de cultures fourragères (*Tripsacum laxum*, *Pennisetum purpureum*) sont également installées sur sols alliques. Mais cette exploitation de jachères longues ou de parcelles fourragères ne représente que de petites superficies et ne recourt à aucune fumure. Le fumier, produit par stabulation nocturne du bétail, est totalement affecté aux parcelles vivrières de l'exploitation agro-pastorale (5 à 10 t/an en moyenne) pour assurer l'auto-suffisance alimentaire. Il existe cependant une théorie, dite de l'effet anthropique (FRANKART *et al.*, 1974), avançant que les sols non alliques, actuellement cultivés en vivres, puissent dériver de sols alliques à l'origine, grâce à une fumure organique répétée durant plusieurs décennies.

D'autres mécanismes ont cependant été proposés par OPDECAMP (1988) pour expliquer les contrastes actuels des caractéristiques d'acidité entre les sols cultivés

et les parcours.

L'intensification de l'exploitation vivrière et fourragère des sols alliques est devenue une préoccupation prioritaire de la recherche agronomique, tant par l'immensité des terres concernées (entre 500 mille et un million d'hectares au Burundi) que par les menaces qu'elles font peser sur l'autosuffisance alimentaire d'une population rurale à fort taux de croissance. Que feront les fermiers de demain, lorsque les seules terres encore disponibles seront affectées par une "per-alumino-toxicité" pour la plupart de leurs cultures ?

Voici des mesures de l'incidence du caractère allique des sols sur la production de manioc et de patate douce. Voici aussi des résultats de simulation de divers types d'exploitation en fonction de ressources virtuelles en fumier ou en fonction d'un accès au crédit rural permettant l'achat d'intrants minéraux, et recourant à des agrotechnologies "classiques". Une évaluation économique est également proposée. Enfin, l'évolution des propriétés du sol est analysée après trois années d'exploitation. Les premières recommandations sont formulées.

## MATERIAUX ET METHODES

### Incidence du caractère allique sur la production de manioc et patate douce.

L'incidence de la propriété allique du sol sur les productions de manioc (*Manihot esculenta*) et de patate douce (*Ipomea batatas*) est déterminée à l'aide d'observations expérimentales effectuées dans un réseau de 40 parcelles du milieu rural, réparties sur près de 20 collines différentes dans la région du Kirimiro. Une minifosse (60 x 60 x 60 cm) est creusée dans chaque parcelle pour l'identification pédologique. Un échantillonnage composite (neuf prises) est réalisé aux profondeurs de 0 à 15 et de 25 à 40 cm, en utilisant une tarière. Les échantillons sont séchés à l'air et tamisés à deux millimètres. Leur analyse physico-chimique porte sur le pH (H<sub>2</sub>O), la conductivité électrique (rapport 1/5), le carbone (Walkey-Black), l'azote (Kjeldahl), les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na extraits par ACNH<sub>4</sub> N et dosés par spectrophotométrie), l'aluminium et l'hydrogène échangeables (extraction au KCl N et dosage par titrimétrie).

Le taux de saturation aluminique effective (m) est établi comme suit :

$$m = 100 \text{ Al/ECEC, où ECEC} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na} + \text{Al} + \text{H}.$$

Chaque parcelle développe une superficie de 320 m<sup>2</sup> et se subdivise en deux parties égales, l'une réservée au manioc, l'autre à la patate douce. Pour chaque cultivar, quatre parcelles élémentaires de 40 m<sup>2</sup> sont délimitées pour les quatre cultivars utilisés. Pour la patate douce, il s'agit des cultivars TIS2498DB, NSASAGATEBO et RUSENYA, ainsi que le cultivar local qui peut varier d'un fermier à l'autre. Pour le manioc, il s'agit des cultivars CRIOLINHA, MPAMBAYABASHENGERA et ZAYIMETI, en plus du cultivar local également.

L'installation, le suivi et la récolte sont assurés par les programmes manioc et patate douce de l'ISABU. Aucune fumure n'est appliquée. La plantation est effectuée en octobre/novembre 1985. La récolte de patate douce a lieu en avril 1986, celle de manioc en novembre 1987.

Toutes les données relatives aux sols et aux rendements obtenus sont stockées sur support informatique sous la forme d'une petite banque de données agro-pédologiques, intitulée "Tubercules dans le Kirimiro" (OTOUL, 1988 ; ISABU,

1989).

### Simulations d'exploitations vivrières et fourragères

Des simulations d'exploitations vivrières et fourragères sont effectuées à la station ISABU de Gisozi sur le site de Nyagatika, à 2055 m d'altitude. Le site est constitué d'un pâturage naturel à *Eragrostis olivacea* au départ. La caractérisation pédologique du site est fournie en annexe I. Le sol est typiquement allique : la saturation effective en aluminium échangeable (m) dépasse 80 % sur plus de 60 cm d'épaisseur. Il est classifié comme "Sombrihumox" dans la "Soil Taxonomy" (SOIL SURVEY STAFF, 1975) et comme "Kaolisol humifère à horizon sombre, typique" dans la classification régionale (TAVERNIER et SYS, 1965).

Trois phases peuvent être distinguées dans l'expérimentation qui s'échelonne de février 1986 à septembre 1989. La première phase couvre la saison 86B et consiste en l'ouverture du pâturage avec patate douce en pratiquant un écobuage. La deuxième phase, que l'on peut appeler d'initiation, se déroule l'année culturale suivante (1987) au cours de laquelle on enregistre les premières productions vivrières et fourragères suivant les types d'exploitation simulés.

Enfin, une troisième phase dite de production, s'étale sur les deux dernières années de l'expérimentation.

Le site occupe une superficie de 54 ares et trois types d'exploitation y sont simulés après l'ouverture. Chaque type d'exploitation comporte six parcelles distribuées comme suit :

- deux parcelles immatriculées "Va" et "Vb" où des spéculations vivrières sont pratiquées en saisons A et B ;
- deux parcelles de graminées fourragères, immatriculées "Fa" et "Fb" qui sont exploitées à un rythme de deux coupes par an ;
- deux parcelles immatriculées "La" et "Lb" où l'on alterne des légumineuses fourragères en saison A avec une jachère ou des céréales en saison B.

Chaque type d'exploitation est simulée en trois répétitions, ce qui implique des observations sur 54 parcelles élémentaires dont la taille est de 90 m<sup>2</sup>. Les trois types d'exploitation peuvent être brièvement décrits comme suit :

- l'exploitation traditionnelle : elle s'appuie exclusivement sur la fumure organique des vivres, sans aucune fumure sur les graminées fourragères. Cette exploitation est simulée pour analyser la théorie de l'effet anthropique, tout en admettant l'indisponibilité actuelle du fumier dans l'extension vivrière sur parcours.
- l'exploitation monétarisée : elle recourt exclusivement aux engrais et amendements minéraux, tant pour la production vivrière que fourragère. Cette exploitation est simulée en conformité avec l'indisponibilité actuelle de fumier et sous l'hypothèse d'un accès au crédit rural permettant l'achat des intrants minéraux utilisés.

- l'exploitation peu monétarisée : elle est intermédiaire entre les deux précédentes en combinant une disponibilité virtuelle en fumier à des quantités réduites de chaux pour la production vivrière et fourragère.

Voici les spécifications générales des agrotechnologies déployées dans les trois types d'exploitation simulés, au cours des trois phases de l'expérimentation. En phase d'ouverture, l'écobuage et le labour du pâturage sont effectués. De la patate douce, CV. RUSENYA, est installée sur toute la superficie du site expérimental. Aucune distinction n'est opérée suivant les types d'exploitation. Les entretiens phytotechniques courants sont assurés. Les mesures de rendement sont réalisées sur six parcelles de 90 m<sup>2</sup> en novembre 1986, huit mois après la plantation des cordes. La phase d'initiation se caractérise par la mise en place des trois types d'exploitation suivant les spécifications phytotechniques générales reproduites aux tableaux 1, 2 et 3 de l'annexe II. Un tonnage de 20 t/ha/an de fumier est appliqué sur vivres et de 10 t/ha sur légumineuses fourragères dans l'exploitation traditionnelle et peu monétarisée.

Les arbustes fourragers, *Calliandra calothyrsus* et *Leucaena diversifolia*, installés dans l'exploitation traditionnelle, sont enlevés pour cause de mauvaise reprise à la fin de l'année culturale 1987. Les graminées fourragères de l'exploitation peu monétarisée sont initiées avec une fumure organique de 20 t/ha, alors qu'aucune fumure n'est appliquée dans les parcelles correspondantes de l'exploitation traditionnelle. Le fumier utilisé dose environ 5 à 7 unités d'azote, 2 à 3 unités de phosphore, 5 à 7 unités de potasse par tonne de produit frais. Il doserait également 0.25 % de CaO et 0.20 % de MgO. Le fumier épandu est enfoui à la houe au moment du semis ou de la plantation.

La chaux utilisée dans l'exploitation monétarisée, à la dose de 1.5 t/ha/an, et dans l'exploitation peu monétarisée, à la dose de 0.5 t/ha/an, est enfouie à la houe 15 jours avant le semis ou la plantation. Il s'agit de chaux du Moso dosant 33 % de CaO et 22 % de MgO.

La fertilisation minérale dans l'exploitation monétarisée fait appel aux engrais simples suivants : urée (46 % N), superphosphate triple (45 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et chlorure de potassium (60 % K<sub>2</sub>O). Ces engrais sont appliqués au semis ou à la plantation aux doses de 23 - 60 - 35 unités NPK à l'hectare (formule NPKa). Une deuxième dose d'azote de 50 kg/ha d'urée est appliquée un à deux mois après le début de la saison dans la formule NPKb, et une troisième dose de 50 kg/ha d'urée est appliquée en saison B dans la formule NPKc réservée aux graminées fourragères. Au cours de la phase dite de production, on procède à une uniformisation des espèces vivrières et de légumineuses fourragères dans les trois types d'exploitation, ce qui permet une comparaison latérale des rendements par analyse de la variance. Le tableau 4 de l'annexe II spécifie la succession saisonnière des spéculations pratiquées au cours de cette phase. Les espèces de graminées fourragères mises en place dans la phase d'initiation restent inchangées.

Les principes de fumure et d'amendement du sol adoptés initialement restent en vigueur. Le tableau 5 de l'annexe II reproduit les détails de l'application d'intrants.

Les modalités d'application du fumier, de la chaux et des engrais, ainsi que leurs caractéristiques, restent identiques à celles de la phase d'initiation. Toutefois, il n'y a plus d'application de fumier sur les graminées fourragères dans l'exploitation peu monétarisée. Sur ces graminées un chaulage d'entretien de 500 kg/ha/an est pratiqué dans l'exploitation peu monétarisée et monétarisée. Il faut signaler également un relèvement des doses PK au niveau de 90 et 60

unités/ha dans l'exploitation monétarisée, dès la saison 88B sur vivres et légumineuses fourragères et lors de la dernière année d'expérimentation sur graminées fourragères.

### Evaluation économique

Un bilan économique est évalué pour les trois types d'exploitation. Une approche des coûts d'exploitation est d'abord opérée en évaluant les coûts du travail et des intrants organiques ou minéraux. Diverses estimations de la quantité de travail pour la production du blé (BERGEN, 1985a ; MATHIEU et BRUYERE, 1987) ou du riz (BERGEN, 1985b) ont été réalisées, qui aboutissent à des valeurs de 350 à 450 HJ (Homme-Jour) par saison et par hectare. A 100 FBU l'homme-jour, un coût de 40 000 FBU/ha peut donc être retenu pour la production d'une céréale. Nous retenons des valeurs plus faibles pour une légumineuse vivrière ou une plante à tubercules, du fait de travaux post-récolte moins fastidieux, soient 35 000 FBU/ha pour la légumineuse et 30 000 FBU/ha pour la plante à tubercules. En production fourragère, on compte une coupe continue à 120 HJ/ha/an pour une graminée et 100 HJ/ha/saison pour une légumineuse. Pour l'installation (labour et semis ou plantation) on compte encore 130 HJ, qui est amortie sur cinq ans pour une graminée et sur une saison pour une légumineuse. Ceci permet d'estimer le coût du travail à 25 000 FBU/ha/saison pour une légumineuse fourragère et à 15 000 FBU/ha/an pour une graminée fourragère. L'épandage ou l'application d'intrants induisent des coûts additionnels en travail : 5 000 FBU/ha pour le fumier, 2 500 FBU/ha pour la chaux ou une formule NPK. Le coût d'application d'une dose supplémentaire d'azote est négligé. D'après des données recueillies par BLAS (1988), le coût des engrais peut varier de 60 à 72 FBU/kg suivant la voie d'importation. Une valeur intermédiaire de 65 FBU/kg est dès lors retenue.

En ce qui concerne le fumier, un prix conventionnel de 1 000 FBU/t est demandé au niveau des divers centres ou stations qui en fournissent occasionnellement. Enfin, le coût des semences ou du matériel de plantation est également comptabilisé, à raison d'un forfait de 5 000 FBU/ha pour la plupart des espèces. Un coût de 60 000 FBU/ha est cependant évalué pour les plançons de pomme de terre et de 25 000 FBU/ha pour les boutures ou éclats de souche de graminées fourragères (amortissement sur 5 ans). Pour établir le bilan économique, les recettes d'exploitation doivent également être estimées, qui découlent de la vente des productions enregistrées. En s'inspirant de données de BERGEN (1986) et de BLAS (op. cit.), on peut fixer les prix des produits vivriers comme suit, en FBU/kg : haricot et pois, 65 ; blé, 55 ; triticales et sorgho, 45 ; maïs, 40 ; pomme de terre, 30 ; manioc, 20 ; patate douce, 15. Les produits fourragers ne sont pas commercialisés. On peut cependant estimer la valeur d'une tonne de graminées fraîche par le coût de gardiennage du bétail sur parcours à *Eragrostis*, qui s'élève à environ 36 000 FBU/an (360 HJ) pour un troupeau moyen de 4 à 5 têtes. A la charge d'une tête à l'hectare et pour une production du pâturage de 15 à 20 t/ha/an, le coût de la tonne varierait entre 360 et 600 FBU. La valeur de 450 FBU/t est dès lors retenue. Pour une légumineuse fourragère, cette valeur peut être multipliée par 1.66, qui exprime le rapport entre les coûts du travail d'une légumineuse et d'une graminée, soit 750 FBU/t. Pour les graines de lupin, produites en saison 87A, une valeur commerciale de 50 FBU/kg est estimée.

Evolution des propriétés du sol.

Un échantillonnage composite de 20 prises est effectué entre 0 et 15 cm sur tout le site expérimental de Nyagatika avant l'écobuage et après la récolte d'ouverture. Après la saison 89A, la parcelle immatriculée "Vb" est échantillonnée aux profondeurs de 7, 20, 33 et 46 cm dans les trois types d'exploitation et les trois répétitions (composites de cinq prises par parcelle). Les échantillons de sol sont soumis à la caractérisation analytique suivant le même protocole d'analyse que celui des 40 parcelles de manioc et patate douce dans le Kirimiro.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

Incidence du caractère allique sur la production de manioc et patate douce.

Les données relatives aux sols et aux rendements des cultivars de manioc et de patate douce dans le réseau expérimental du Kirimiro, sont regroupées en annexe II. Plusieurs données de rendement sont portées manquantes, soit par abandon des fermiers, soit par récolte prématurée par les fermiers, soit encore par un mauvais entretien des parcelles. Les paramètres statistiques de la comparaison des moyennes de rendement suivant la nature allique ou non allique des sols sont présentés au tableau I.

Tableau I : Comparaison des moyennes de rendement des quatres cultivars de patate douce et de manioc suivant la nature allique ou non allique des sols dans le Kirimiro.

Espèce cultivar	Effectif		Rend. moy. (t/ha)		Ecart-types		F.obs.	CV <sup>3</sup> %
	SA <sup>1</sup>	SNA <sup>2</sup>	SA	SNA	SA	SNA		
<u>Patate douce</u>								
TIS 2498DB	12	8	5.5	6.3	4.4	5.3	0.15	83
NSASAGATEBO	14	14	8.2	14.9	6.5	9.1	4.91*	69
RUSENYA	14	14	8.6	16.1	6.3	9.7	5.87*	66
LOCAL	14	12	6.2	11.7	5.3	6.8	5.43*	69
<u>Manioc</u>								
CRIOLINHA	17	14	12.4	19.3	9.5	8.4	4.66*	58
MPAMBAYB.	16	14	5.2	9.9	4.8	10.1	1.62 <sup>4</sup>	-
ZAYIMETI	12	14	4.0	8.6	3.9	8.1	1.88 <sup>4</sup>	-
LOCAL	16	10	10.5	18.2	13.8	13.2	1.97	101

Remarques : <sup>1</sup>Sols alliques <sup>2</sup>Sols non alliques <sup>3</sup>Coefficient de variation de l'analyse de la variance <sup>4</sup>Test "t" car variances inégales.

Malgré des coefficients de variation très élevés, ce qui est une observation assez courante en milieu rural, des différences significatives de productivité sont détectées en faveur des sols non alliques pour trois cultivars de patate douce et pour le cultivar CRIOLINHA de manioc. La sensibilité de ces deux plantes à tubercules à de fortes concentrations en aluminium dans le sol est donc mise en évidence. ARRUNA-RODRIGUEZ *et al.* (1982) l'observent également à Puerto-Rico, mais ils remarquent une très bonne tolérance du manioc. Les rendements de manioc qu'ils mesurent en conditions alliques sont plus élevés, près de 20 t/ha, mais ils sont obtenus en présence d'une formule 50-50-50 unités NPK à l'hectare. Remarquons dans les résultats de l'annexe III que des pointes de rendement de plus de 20 t/ha en patate douce et un pic de 57 t/ha de manioc sont observés sur sols alliques du Kirimiro, qui tout en étant exceptionnels laissent présumer que la toxicité aluminique peut être masquée par d'autres facteurs de fertilité, peut-être purement biologiques.

Simulations d'exploitations vivrières et fourragères.

Les rendements de patate douce varient entre 0.6 et 3.0 t/ha à la phase d'ouverture des simulations d'exploitations opérées dans les conditions alliques de Nyagatika (saison 86B). Ces rendements sont donc bien en-deça des moyennes du Kirimiro.

Le tableau II rassemble les rendements en vivres et légumineuses fourragères en phase d'initiation. Ils sont assez médiocres en général, sauf peut-être pour le rendement en graines de lupin, cette espèce s'étant comportée de manière assez luxuriante en saison 87A. Pour les rendements du blé en saison 87B, un élément de comparaison nous est offert par les travaux de MATHIEU et BRUYERE (op.cit.) en conditions alliques à Kajondi. Avec 4 t/ha de fumier, 2 t/ha de calcaire et une fumure NK de fond, ces auteurs obtiennent 312 kg/ha de blé en ouverture, ce qui est identique au rendement de l'exploitation peu monétarisée de Nyagatika, associant également chaux et fumier. Toutefois, ces auteurs obtiennent des rendements nettement supérieurs en conditions d'exploitation monétarisée avec plus de 1200 kg/ha, pouvant atteindre les 2000 kg/ha en accroissant la fertilisation phosphorée à 120 unités/ha.

Tableau II : Rendements moyens en vivres et légumineuses fourragères enregistrés dans les trois types d'exploitation simulés à Nyagatika en phase d'initiation.

Saison	Spéculation	Rendements moyens			Unité
		TRA <sup>1</sup>	MO <sup>2</sup>	PMO <sup>3</sup>	
87A	(Maïs + Haricot DORE) <sup>4</sup>	234	512	144	kg/ha
	(Maïs + Haricot URU) <sup>6</sup>	156	149	247	"
	Haricot	140	- <sup>5</sup>	-	"
	Mucuna	99	-	-	"
	Vesce	-	268	429	"
	Lupin <sup>7</sup>	-	8.0	-	t/ha
			-	4.5	3.6
87B	Triticale	-	-	0.8 <sup>7</sup>	"
	Pois	426	-	-	kg/ha
	Blé	131	-	-	"
	Sorgho	-	342	314	"
		-	893	663	"

Remarques : <sup>1</sup>Exploitation traditionnelle    <sup>2</sup>Exploitation monétarisée  
<sup>3</sup>Exploitation peu monétarisée    <sup>4</sup>Association maïs-haricot  
CV. DORE DE KIRUNDO    <sup>5</sup>Spéculation non pratiquée  
<sup>6</sup>Association maïs-haricot CV. URUBONOBONO    <sup>7</sup>Rendement en graines de lupin.

Une autre opportunité de comparaison se présente avec les travaux de LANDA sur association maïs-haricot (ISABU, 1984). Le tableau III est un extrait de ses résultats obtenus à Gisozi en conditions d'acidité contrastées.

Tableau III : Rendements (kg/ha) de l'association maïs-haricot en saison 84A, dans des conditions d'acidité contrastées, avec ou sans fumier (20 t/ha). Source : ISABU, 1984.

Indice m	Maïs		Haricot	
	Témoin	Fumier	Témoin	Fumier
8	3650	4470	270	400
72	170	530	10	89

En conditions alliques, ces résultats sont similaires à ceux de Nyagatika. Toutefois, ils permettent de repréciser l'incidence négative de ces conditions sur la production vivrière par rapport à des conditions de moindre acidité, particulièrement remarquable sur maïs.

Le tableau IV fournit les éléments de comparaison des rendements en vivres et légumineuses fourragères en phase de production à Nyagatika. Les rendements les plus faibles, souvent dérisoires, quasi-nuls mêmes pour le blé et le sorgho de saison B, sont enregistrés dans l'exploitation traditionnelle, c'est-à-dire en utilisant uniquement une ressource virtuelle en fumier. Une exception importante est cependant à signaler avec la patate douce en saison 89A, où une production très satisfaisante est obtenue dans cette exploitation.

Pour le maïs, une tendance à un accroissement de productivité se dégage dans les trois types d'exploitation. Les résultats sur pommes de terre sont particulièrement intéressants dans l'exploitation monétarisée où près de 20 t/ha sont enregistrés en saison 88A.

RUTUNGA et NEEL (1980) obtiennent aussi des résultats significatifs avec cette espèce, plus faibles cependant (10 à 13 t/ha), à Mata au Rwanda, dans des conditions pédologiques et de fertilisation minérale similaires. Les rendements de pois en saison B restent décevants dans les trois types d'exploitation, ce qui est observé également par RUTUNGA et NEEL (op.cit.) en conditions d'exploitation monétarisée.

A condition de chauler et d'appliquer une fertilisation minérale NPK suffisante (au moins 90 unités de P et 60 unités de K), il semble qu'on puisse diagnostiquer un potentiel de diversification en céréales (maïs, blé) et en pomme de terre pour l'exploitation vivrière des sols alliques, par rapport aux pratiques traditionnelles. On réservera pour l'instant son avis en ce qui concerne les légumineuses fourragères (voir bilan économique plus loin).

Tableau IV : Comparaison des rendements moyens en vivres et légumineuses fourragères enregistrés dans les trois types d'exploitation simulés à Nyagatika en phase de production. Pour chaque espèce, les chiffres de rendements suivis de la même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %.

Saison	Spéculation	Rendements moyens			Unité	F.Obs.	CV %
		TRA <sup>1</sup>	MO <sup>2</sup>	PMO <sup>3</sup>			
88A	Pomme de terre	3.5a	19.0b	8.7c	t/ha	294.5***	8
	Maïs	844a	1427b	1587b	kg/ha	7.5*	19
	Lupin	5.1a	12.6b	11.4b	t/ha	7.4*	26
	Mucuna	4.0a	14.3b	6.7a	t/ha	37.0**	18
88B	Triticale	393a	1132b	664a	kg/ha	17.6*	21
	Pois	222a	176a	525a	kg/ha	5.9	44
	Sorgho	0a	1509b	2a	kg/ha	56.7**	40
	Blé	23a	1237b	74a	kg/ha	129.9**	24
89A	Patate douce	14.5a	14.0a	20.9a	t/ha	1.1	38
	Maïs	1032a	2691b	1766c	kg/ha	73.9**	9
	Mucuna	1.1a	6.5b	3.7c	t/ha	55.4**	17
89B	Pois	95a	249a	305a	kg/ha	4.7	40
	Blé	7a	2038b	531a	kg/ha	36.1**	39
	Sorgho	0a	1200b	32a	kg/ha	22.5**	61

Remarques : <sup>1</sup>Exploitation traditionnelle <sup>2</sup>Exploitation monétarisée  
<sup>3</sup>Exploitation peu monétarisée.

Quelle quantité de chaux ou de calcaire faut-il appliquer ? Il existe à cet égard des formules empiriques exigeant une analyse de sol et basée sur une neutralisation partielle ou complète de l'aluminium échangeable. La plus courante est celle proposée par KAMPRATH (1970). WOUTERS (1989) en propose une adaptation pour le Burundi. Adaptée de ces formules, mais tenant compte d'une neutralisation partielle de l'aluminium jusqu'à un seuil optimum, la formule suivante peut encore être proposée au Burundi :

$$BC = \frac{dA \cdot PE \cdot (m - mo) \cdot ECEC}{24 \text{ TCA} + 33 \text{ TMG}}$$

Où : BC est le besoin en chaux/calcaire (en t/ha)

dA est la densité apparente du sol

PE est l'épaisseur de sol (en cm) neutralisée par enfouissement

m est le taux de saturation aluminique effective (en %)

mo est le taux optimum de saturation aluminium suivant l'espèce (en %)

TCA et TMG sont les teneurs en CaO et MgO de la chaux ou calcaire (en %)

ECEC est la capacité d'échange cationique effective du sol (en méq/100 gr)

Des taux optima de saturation aluminique ont été établis par OPDECAMP *et al.* (1988). Par défaut, on peut retenir un taux optimum de 20 % pour la plupart des

espèces vivrières et fourragères. La profondeur d'enfouissement à la houe peut être évaluée à 15 cm. La densité apparente dans les sols humifères d'altitude est faible et peut être assimilée à 1. Une valeur de 85 peut être retenue par défaut pour la saturation aluminique dans les pâturage à *Eragrostis*, et de 4.5 méq/100 gr pour l'ECEC. Dès lors, le besoin en chaux provenant du Moso s'évaluerait à environ 3 t/ha dont il faudrait assurer un épandage tous les trois à cinq ans. Cette dose est celle proposée par SHEHATA et SCHALBROECK (1984) sur maïs en conditions alliques du Mugamba. Une fertilisation PK devrait accompagner tout chaulage important sur sol allique. L'élévation du rapport (Ca + Mg)/K peut en effet générer des déficiences en potassium. D'autre part, le chaulage pourrait réduire le phosphore assimilable sous forme de complexes Al - P, exigeant alors une substitution par des complexes Ca - P ou Mg - P.

Les tableaux V et VI fournissent les éléments de comparaison des productions cumulatives de graminées fourragères enregistrées à Nyagatika. Ici aussi c'est l'exploitation traditionnelle qui s'avère la moins performante. Une production moyenne annuelle de moins de 20 t/ha de graminées y est enregistrée, comparable donc à celle d'un pâturage naturel. Dans les deux autres types d'exploitation des productions supérieures sont observées, de plus de 30 t/ha/an en moyenne, dépassant même 45 t/ha/an avec le *Pennisetum* dans l'exploitation peu monétarisée.

Tableau V : Comparaison des rendements cumulatifs moyens de *Setaria splendida* enregistrés en t/ha de matière fraîche à Nyagatika dans les trois types d'exploitation simulés.

Date	Rendement			F.obs.	CV %	Comparaisons moyennes (5 %)
	TRA <sup>1</sup>	MO <sup>2</sup>	PMO <sup>3</sup>			
06/87	15.8	28.9	46.4	35.5**	15	PMO>MO>TRA
01/88	31.4	55.0	68.3	19.1*	14	PMO=MO>TRA
06/88	40.9	67.1	79.9	15.0*	14	PMO=MO>TRA
01/89	49.2	79.9	89.0	10.9*	15	PMO=MO>TRA
06/89	54.5	91.3	97.1	13.5*	13	PMO=MO>TRA

Remarques : <sup>1</sup>Exploitation traditionnelle <sup>2</sup>Exploitation monétarisée  
<sup>3</sup>Exploitation peu monétarisée.

Tableau VI : Comparaison des rendements cumulatifs moyens de *Pennisetum purpureum*<sup>1</sup> et *Tripsacum laxum*<sup>2</sup> enregistrés en t/ha de matière fraîche à Nyagatika dans les trois types d'exploitation simulés.

Date	Rendement			F.obs.	CV %	Comparaisons moyennes (5 %)
	TRA <sup>3</sup>	MO <sup>4</sup>	PMO <sup>5</sup>			
06/87	5.6	9.5	56.2	54.5**	28	PMO>MO=TRA
01/88	19.9	35.6	88.8	56.7**	17	PMO>MO=TRA
06/88	27.3	54.9	109.0	55.9**	15	PMO>MO>TRA
01/89	40.5	76.9	126.4	46.3**	13	PMO>MO>TRA
06/89	45.1	103.3	140.9	36.6**	14	PMO>MO>TRA

Remarques : <sup>1</sup>Spéculation de l'exploitation traditionnelle et peu monétarisée  
<sup>2</sup>Spéculation de l'exploitation monétarisée <sup>3</sup>Exploitation traditionnelle <sup>4</sup>Exploitation monétarisée <sup>5</sup>Exploitation peu monétarisée.

#### Evaluation économique.

L'évaluation des bilans économiques des trois types d'exploitation simulée à Nyagatika est présentée en annexe IV.

Une seule spéculation est évaluée comme rentable dans l'exploitation traditionnelle. Il s'agit de la patate douce qui dégage un solde créditeur de plus de 150 000 FBu/ha. Sans la moindre fertilisation, la production critique (production minimum couvrant les coûts) de patate douce ou de manioc est évaluée à 2.3 t/ha, ce qui est localement obtenu en ouverture à Nyagatika, mais qui est largement dépassé en moyenne dans le Kirimiro pour tous les cultivars des deux espèces considérées. Cette seule spéculation vivrière rentable est également l'une des seules qui est traditionnellement pratiquée sur sol allique. Signalons que le cultivar INZOVU Y'UMUGAMBA, avec lequel de hauts rendements sont obtenus à Nyagatika, est une variété sélectionnée sur base phytosanitaire comme indemne de toute virose.

Remarquons la non rentabilité théorique des légumineuses et graminées fourragères dans les trois types d'exploitation par rapport à la référence du gardiennage du bétail sur parcours.

La production critique en graminées fourragères devrait atteindre 150 t/ha/an dans l'exploitation monétarisée, ce qui paraît utopique. Mais on pourrait imaginer de résorber les frais du chaulage et de fortes doses de phosphore et de potasse en ouvrant avec une culture comme la pomme de terre. Cette espèce s'avère une espèce à haut rendement économique, capable d'amortir quasi-instantanément les investissements consentis. Il en va de même avec la patate douce ou le manioc, ce dernier étalant cependant son cycle sur une période plus longue. Enfin, le potentiel de diversification vivrière par des céréales est confirmé par leurs bilans économiques qui deviennent positifs pour le blé et le maïs en année culturale 1989 dans l'exploitation monétarisée.

Evolution des propriétés du sol.

L'évolution des propriétés du sol de Nyagatika suite à l'écobuage d'ouverture est présentée au tableau VII.

Tableau VII : Caractéristiques physico-chimiques du sol de Nyagatika en surface (0 - 15 cm), avant et après ouverture. Valeurs moyennes sur quatre échantillons composites de 20 prises (saison 86B).

Echantillon	pH	KCl	CE mmho/cm	C %	N %	C/N
	H <sub>2</sub> O					
Avant	4.9	4.0	0.036	4.35	0.27	16.1
Après	4.4	4.0	0.045	4.41	0.27	16.3

Echant.	----- Complexe adsorbant (méq/100 gr) -----							m %
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	ECEC	
Avant	0.24	0.10	0.13	0.13	4.14	0.18	4.92	84
Après	0.08	0.09	0.11	0.02	4.57	0.18	5.05	90

On n'observe aucun effet bénéfique de l'écobuage sur les caractéristiques du sol : aucune amélioration n'est détectée, plutôt une légère dégradation. Cela s'explique par la faible biomasse d'une prairie, dont le brûlis ne fournit que des quantités infimes de cendres, en rien comparables à celles libérées par la mise à feu d'une forêt dense.

Une évolution schématisée du complexe adsorbant du sol à Nyagatika, après 3 ans d'exploitation simulée sous diverses conditions de fumure organo-minérale, est présentée à la figure 1 sur base des résultats d'analyse reproduits en annexe V.

La correction de l'acidité du sol par applications répétées de fumier dans l'exploitation traditionnelle est à peine détectée et limitée aux 10 premiers centimètres d'épaisseur. On y détecte corrélativement une légère resaturation en Ca, Mg et K. L'enrichissement en K se marque cependant sur une épaisseur plus importante, jusqu'à près de 40 cm de profondeur.

Les applications répétées de fumier et de petites quantités de chaux dans l'exploitation peu monétarisée produisent des effets plus marquants sur la réduction de l'acidité du sol et sa resaturation en bases, mais ils restent modestes et toujours assez superficiels. Enfin, les quantités plus importantes de chaux associées à la fertilisation minérale de l'exploitation monétarisée produisent les effets les plus remarquables sur la correction de l'acidité et la resaturation en bases, sauf pour la potasse. Ces effets ne se détectent cependant plus en-deçà de 30 à 45 cm, et sont surtout nets dans la partie superficielle.

L'absence de migration profonde des bivalents en cas d'application superficielle de carbonates de calcium est mise en évidence par les travaux de PAVAN *et al.* (1984) sur un oxisol acide du Brésil. Ces auteurs observent une meilleure

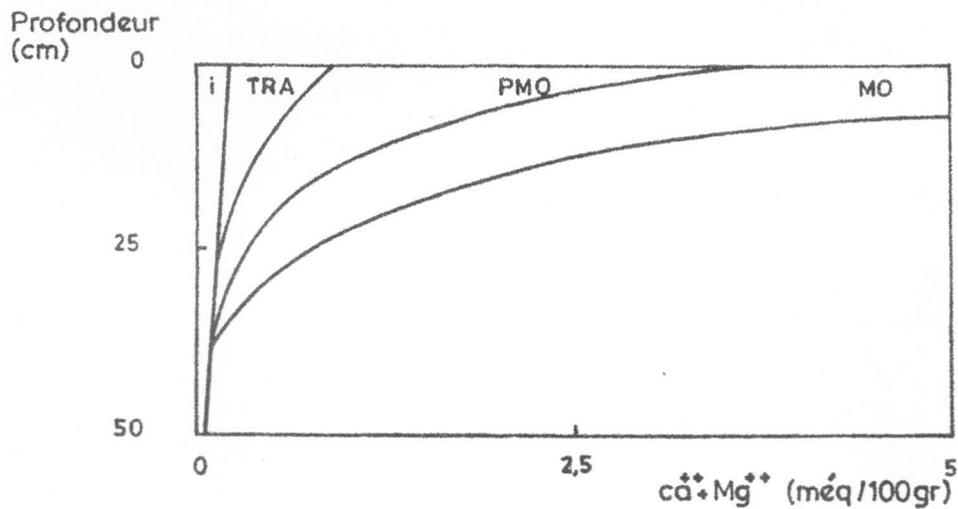
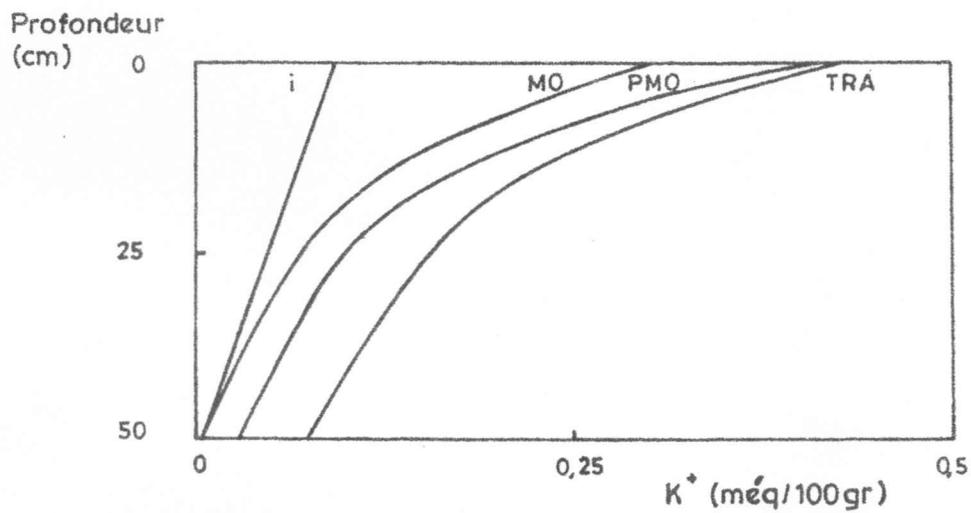
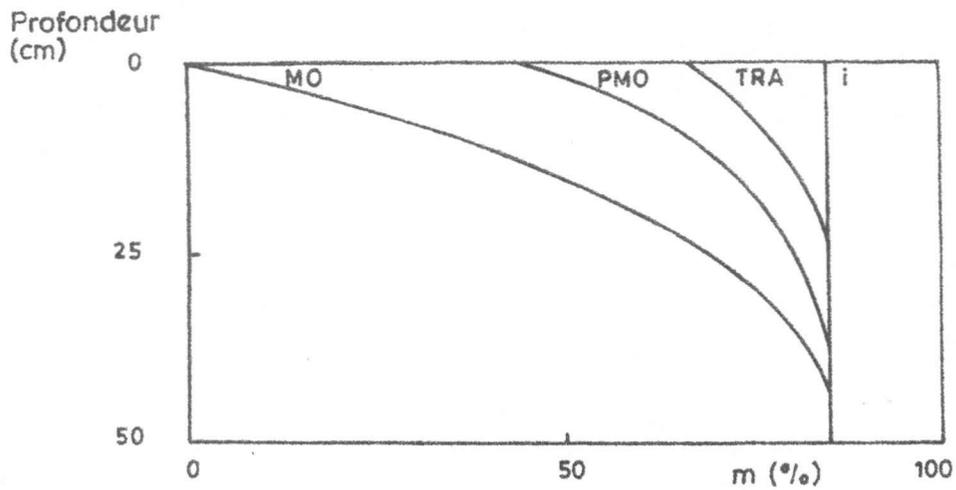


Figure 1 : Evolution schématisée du complexe adsorbant du sol allique de Nyagatika après 3 ans d'exploitation, dans les 50 premiers cm d'épaisseur (saturation en aluminium,  $m$ , potassium échangeable,  $K^+$ , calcium et magnésium échangeables,  $Ca^{++} + Mg^{++}$ )

i : situation initiale

TRA : exploitation traditionnelle (20t/ha/an de fumier)

PMO : exploitation peu monétarisée (20t/ha/an de fumier + 500 kg/ha/an de chaux)

MO : exploitation monétarisée (1,5t/ha/an de chaux + NPK)

redistribution du calcium lorsque du gypse est appliqué ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Les ions sulfates auraient par ailleurs une certaine action neutralisante sur l'aluminium en profondeur par formation de sulfates d'aluminium polymérisés. Que ce soit avec de la chaux ou du calcaire, la réaction avec un sol acide ne produit pas un anion stable soluble, susceptible d'entraîner les bivalents en profondeur :  $\text{HCO}_3$  peut se décomposer en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  ;  $\text{OH}$  peut réagir avec le complexe adsorbant pour générer de nouvelles charges négatives, ou "hydroxy-polymériser" l'aluminium. Ceci implique qu'en cas de chaulage d'un sol allique profond, le développement racinaire peut rester superficiel avec risque de stress hydrique pour la plante (particulièrement en saison B au Burundi). L'incorporation de la chaux en profondeur et/ou une application additionnelle de gypse est dès lors recommandée par un logiciel système-expert comme ACID4 (1987). A titre d'information, les résultats de la consultation de ce système sont présentés en annexe VI pour une culture comme la pomme de terre et dans le cas du profil initial de Nyagatika reproduit en annexe I. A défaut de gypse, la kiésérite pourrait avoir des effets similaires (sulfates de magnésium).

#### DISCUSSION GENERALE

L'identification des sols alliques dans les régions d'altitude au Burundi n'exige généralement pas d'analyses de laboratoire. Ces sols sont exploités de manière extensive et spécifique comme parcours pour le bétail ou comme jachères longues, de manière moins spécifique comme parcelles de manioc ou patate douce, comme parcelles d'extensions fourragères ou encore par la théiculture et la sylviculture. Le théier ne souffre pas de toxicité aluminique : c'est une plante qui accumule l'aluminium dans ses feuilles sous forme de complexes avec des acides organiques et des flavonols. Il existe également de nombreuses essences forestières susceptibles d'accumuler l'aluminium (CHENERY, 1946 ; HARIDASAN, 1982). Les *Eucalyptus* notamment pourraient en faire partie, mais nous manquons de références à ce sujet.

D'après les simulations effectuées à Nyagatika, avec une gamme assez large d'espèces vivrières et fourragères, les ressources traditionnelles paraissent bien insuffisantes pour assurer une diversification de l'exploitation des sols alliques.

Même en recourant à une disponibilité virtuelle en fumier, aucune potentialité économique réelle ne se dégage et l'amélioration du sol reste peu perceptible au bout de trois ans de fumure organique intensive.

Les contraintes spécifiques des sols alliques imposent une amélioration foncière par voie minérale, impliquant des investissements financiers de l'exploitant, qui ne sont pas sans risques et qui supposent un accès au crédit rural.

Les premières recommandations qu'on peut émettre devront être renforcées et affinées par la recherche et l'expérimentation agronomiques au cours des prochaines années.

#### PREMIERES RECOMMANDATIONS.

1. La diversification de l'exploitation vivrière et fourragère des sols alliques impose un chaulage pour neutraliser la "per-alumino-toxicité" qui les

caractérise à l'égard de nombreuses espèces. A défaut d'analyse de sol, une dose de 3 t/ha de calcaire ou de chaux peut être appliquée à l'ouverture et renouvelée tous les trois à cinq ans. Un enfouissement de l'amendement par labour profond est recommandé.

2. L'indisponibilité de ressources supplémentaires en fumier et les risques de déficiences PK induites par le chaulage imposent également une fertilisation minérale PK de correction sur sol allique. Une dose minimum de 90 unités de P et de 60 unités de K est recommandée après le chaulage. Une fertilisation minérale azotée est également recommandée, mais elle n'est pas spécifique aux sols alliques.
3. L'apport de K sous forme de sulfates et un apport additionnel de gypse et/ou de kiésérite contribueraient à améliorer la performance du chaulage.
4. Le recours quasi-obligé aux amendements et engrais minéraux imposent une monétarisation nécessitant l'instauration du crédit rural.
5. L'investissement financier consenti à l'ouverture ne peut pas être amorti par n'importe quelle spéculation. Dans les conditions actuelles du marché, la pomme de terre ou la patate douce, plus secondairement le manioc, sont les spéculations d'ouverture conseillées, que ce soit pour assurer une diversification vivrière ou fourragère.
6. La diversification céréalière avec des espèces comme le blé, le maïs et peut-être le sorgho, offre le plus de chances de réussite après l'ouverture. Une fumure minérale d'entretien NPK s'avèrerait cependant nécessaire, de type "40-40-0" ou "40-60-30".
7. La diversification fourragère après ouverture, est plus risquée sur sols alliques, dans les conditions actuelles du marché. Une graminée fourragère comme *Pennisetum purpureum* ou le *Tripsacum laxum* s'y prêterait mieux qu'une quelconque légumineuse fourragère, mais exigerait aussi une fumure minérale d'entretien.
8. L'extension de l'exploitation sylvicole ou théicole des terres alliques pourrait offrir une alternative économique moins coûteuse et moins risquée.

#### REMERCIEMENTS.

Les observations en milieu rural du Kirimiro dans les parcelles de manioc et patate douce se sont réalisées avec l'appui de MM. J. SAKUBU, M. NTIMPIRANGEZA et G. SOTTIAUX, ainsi qu'avec la collaboration de la SRD KIRIMIRO. Les auteurs les remercient ainsi que les fermiers de la région qui ont accepté de participer à ce programme.

Les simulations d'exploitations effectuées à Nyagatika ont reçu un appui financier de la Commission des Communautés Européennes grâce au contrat n° TSD-A-411-RU(MR) consacré à l'Etude de la toxicité alumino-manganique des sols d'altitude du Burundi.

Des remerciements sont adressés à Mr. I. MUSONI pour sa contribution de terrain en phase d'ouverture et d'initiation, à Mr. A. NZOKIRANTEVYE pour sa contribution

de terrain en phase de production, et à Mme M-T. MUGISHA pour la dactylographie de ce document.

## LITTERATURE CITEE

ABRUNA-RODRIGUEZ F., J. VICENTE-CHANDLER, E. RIVERA and J. RODRIGUEZ ; 1982. Effect of soil acidity factors on yields and foliar composition of tropical root crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46 : 1004 - 1007.

ACID 4 ; 1987. An expert system to manage soil acidity in the humid tropics. The center for soil research, Bogor, Indonesia, University of Hawaiï and North Carolina State University and USAID.

BERGEN D. ; 1985a. Etude socio-économique sur la culture du blé dans le Mugamba. Publication ISABU n° 81 : 109 p.

BERGEN D. ; 1985b. Etude socio-économique sur la culture du riz dans le périmètre de Mugerero (SRD IMBO). Publication ISABU n° 74 : 96 p.

BERGEN D. ; 1986. Guide d'interprétation et de comparaison des prix des produits vivriers entre régions naturelles. Complément aux études sur les flux des produits agricoles et leurs facteurs influents au Burundi. Publication ISABU n° 99 : 41 p.

BLAS J. ; 1988. La commercialisation des intrants et des cultures au Burundi. Rapport de Mission FAO auprès du Ministère du Développement Rural : 61 p.

CHENERY E.M. ; 1946. Aluminium in trees. *The Empire forestry review* 25 : 255 - 256.

DOERGE, T.A. and E.H. GARDNER ; 1985. Reacidification of two lime amended soils in Western Oregon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 680 -685.

FRANKART R., H. NEEL et G. SOTTIAUX ; 1974. Les sols humifères des régions d'altitude du Rwanda et du Burundi. Evolution sous l'action anthropique. *Pédologie XXIV (2)* : 164 - 177.

HARIDASAN M. ; 1982. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. *Plant and Soil* 65 : 265 - 273.

ISABU ; 1984. Rapport annuel. Département Aménagement du Milieu. Groupe Fertilité des Sols. Essais AM8401 (C. LANDA). Tome 3 : 15 - 23.

ISABU ; 1989. Rapport annuel. Service de Biométrie et Informatique. (banques de données sur ordinateur).

KAMPRATH E. J. ; 1970. Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34 : 252 - 254.

MATHIEU C. et A. BRUYERE ; 1987. Station expérimentale IBSNAT de Kajondi ; rapport périodique n° 1. Université du Burundi, Fac. Sci. Agron. ; Dpt. Sci. Sol : 65 p.

OPDECAMP L. ; 1986. PTR-SAV. Prototype de taxonomie régionale des sols a-volcaniques. Publication ISABU n° 102 : 24 p.

OPDECAMP L. ; 1988. Mécanismes de pédogenèse acide dans les régions agropastorales d'altitude du Burundi. Publication ISABU n° 127 : 14 p.

OPDECAMP L., I. MUSONI et J. GOURDIN ; 1988. Effets stimulants et toxiques de l'aluminium sur la croissance des plantes cultivées dans les sols humifères acides du Burundi. Publication ISABU n° 129 : 26 p.

OTOUL C. ; 1988. L'informatique au service de Biométrie-Informatique : ordinateur, bibliothèque de programmes et banques de données. Publication ISABU n° 118 : 55 p.

PAVAN M.A., F.T. BINGHAM and P.F. PRATT ; 1984. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminium following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 48 : 33 - 38.

RUTUNGA V. et H. NEEL ; 1980. Problèmes de fertilisation des sols de prairie à Eragrostis de haute altitude (Mata). Publication ISAR n° 4 : 78 p.

SANCHEZ P.A. ; 1973. Nitrogen fertilization. Pp. 90 - 125. In P.A. Sanchez (ed.), "A Review of Soils Research in Tropical Latin America". North Carolina Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 219.

SANCHEZ P.A. , J.H. VILLACHICA and D.E. BANDY ; 1983. Soil Fertility dynamics after clearing a tropical rain forest in Peru. Soil Sci. Soc. Am. J. 47 : 1171 - 1178.

SHEHATA N. et J.J. SCHALBROECK ; 1984. Effet du chaulage et de la fertilisation sur le maïs dans le Mugamba. Publication ISABU N° 43 : 21 p.

SOIL SURVEY STAFF ; 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agric. Handbook n° 436 ; Soil Conservation Service ; U.S. Dept. Agric. ; U.S. Govt. Printing office ; Washington, D.C. : 754 p.

TAVERNIER R. and C. SYS ; 1965. Classification of the soils of the Republic of Congo (Kinshasa). In Pédologie, Int. Symp. 3, Soil Classification (Ghent) : 91 - 136.

WOUTERS J.F.R. ; 1989. Maintien et amélioration de la fertilité des sols du Burundi par la valorisation des ressources calco-magnésiennes locales. Université du Burundi. Fac. Sc. Agr. : 47 p.