

**GENESE, CARACTERISTIQUES ET CONTRAINTES  
D'AMENAGEMENT DES SOLS ACIDES A HORIZON  
SOMBRE DE PROFONDEUR DE LA REGION DE  
HAUTE ALTITUDE DU RWANDA**

---

**B. MUTWEWINGABO**

*Université Nationale - BP 117 - Butaré - RWANDA*

**RESUME**

---

*Les sols à horizon sombre de profondeur occupent d'importantes superficies en Afrique Centrale et particulièrement dans la région de haute altitude du Rwanda située entre 1800 et 2800 m d'altitude. Ces sols, très fortement à extrêmement acides et pourvus de teneurs élevées d'aluminium soluble, posent non seulement de sérieux problèmes de fertilité, mais constituent aussi un défi du point de vue taxonomique étant donné l'existence de controverses quant à la genèse de ces horizons sombres.*

*Une étude de caractérisation macro et microscopique de ces sols a mis en évidence plusieurs traits pédologiques dont la majorité sont superposés et entrecroisés, de sorte qu'il a été quasi impossible de classer ces traits par ordre chronologique. Elle a révélé un remaniement intense des sols par les processus de bio et de pédoturbation, érosion comprise, et plusieurs phases de développement des sols (sols polyphasés). Dans ces sols plusieurs phénomènes, notamment la présence de charbon de bois et de discontinuités latérales dans tous les horizons, plaident en faveur d'anciens horizons A de surface enfouis, qui ont été réorganisés dans la plupart des cas par des processus pédologiques et qui ont acquis les caractéristiques d'horizons B illuviaux. Par ailleurs, certains sols ont montré des cutanes d'illuviation complexes où des microlits de matière organique alternent avec des argilanes d'illuviation, ce qui complique la compréhension de la genèse de l'horizon sombre de profondeur. Plusieurs interprétations de la genèse de ces horizons sombres étant possibles, pour pouvoir classer ces sols dans les diverses taxonomies, nous proposons de modifier la définition de l'horizon sombre en supprimant l'adjectif "illuvial" qui traduit l'aspect génétique de ces sols. En outre, les études sur la mise en valeur de ces sols montrent la nécessité d'une*

*application combinée de chaux, de matière organique (fumier de ferme, compost, engrais vert) et d'engrais minéral N-P-K et Mg.*

## INTRODUCTION

---

Les sols à horizon sombre de profondeur occupent une étendue relativement importante en Afrique Centrale. D'après la carte géographique des sols dressée par l'Institut National pour l'Etude Agronomique au Congo (INEAC) en 1954, ils se rencontrent principalement dans les hauts plateaux du nord-est du Zaïre et dans les régions montagneuses voisines, à l'ouest de la vallée du rift, anciennement nommé Albert Tanganyika, et à l'est de ce rift dans les régions de haute altitude et de moyenne altitude du Rwanda et du Burundi, de même qu'au sud-ouest de l'Uganda (fig. 1).

Au Rwanda, ces sols occupent une superficie importante dans les régions de haute et de moyenne altitude situées au-dessus de 1 500 m (KELLOG et DAVOL, 1949 ; VAN WAMBEKE, 1963 ; NEEL, 1968 ; FRANKART, 1981). Dans la région de haute altitude comprise entre 1 800 et 2 800 m d'altitude, ils sont probablement les plus abondants des sols acides de cette région.

Ces sols, caractérisés par un horizon sombre de profondeur, sont généralement très acides, désaturés en bases et pourvus de grandes quantités d'aluminium soluble. Ils sont connus non seulement par les sérieux problèmes de fertilité qu'ils posent, mais également par le défi qu'ils présentent au point de vue taxonomique, face aux controverses quant à la genèse de leur horizon foncé de profondeur.

Pour certains, et particulièrement les pédologues de l'INEAC qui ont surtout travaillé au Zaïre (RUHE, 1956 ; SYS *et al.*, 1961), l'horizon sombre de profondeur est un horizon B formé par l'accumulation de matière organique illuviée sous l'influence prépondérante du climat. Il se serait formé par un processus identique à celui de l'horizon spodique rencontré dans les régions de climat tempéré. Ces sols à horizon sombre ayant généralement les caractéristiques d'un kaolisol, certains auteurs (RUHE, 1956) envisagent la possibilité d'un sol polygénique qui aurait évolué sous l'influence des différents régimes climatiques qui se sont succédés en Afrique Centrale. Des périodes climatiques froides et humides auraient créé un environnement favorable à la podzolisation au cours du Pléistocène, puis

*Les sols à horizon sombre du Rwanda*

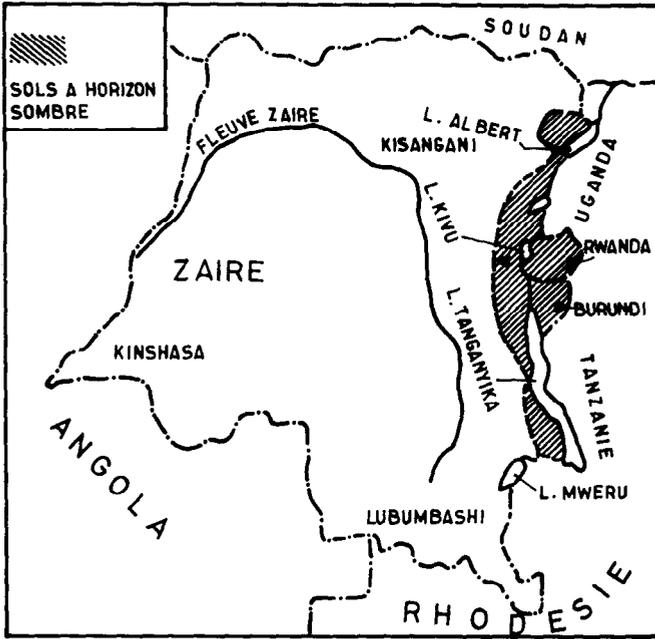


Figure 1 : Esquisse de la carte de distribution des kaolisols à horizon sombre au Zaïre, au Rwanda et au Burundi (d'après INEAC, 1954)

l'évolution serait devenue favorable au développement d'un kaolisol. Toutefois, sur la base de la situation de ces sols dans des zones climatiques spécifiques (climat de pluviosité élevée et d'altitude généralement supérieure à 1 500 m), ces auteurs (LEBRUN, 1955 ; RUHE, 1956) pensent que l'horizon sombre peut être le résultat des processus pédologiques actuels, comme il peut être le vestige d'un climat ancien (horizon relique), ou encore le résultat des effets combinés des différents climats anciens et du climat actuel. Pour d'autres, et plus particulièrement les pédologues qui ont surtout oeuvré au Rwanda (KELLOG et DAVOL, 1949 ; NEEL *et al.*, 1982), l'horizon sombre serait un ancien horizon A de surface enfoui, qui aurait acquis les caractéristiques d'un horizon B illuvial.

Le concept d'un horizon sombre formé par l'illuviation de la matière organique ayant été adopté par les auteurs de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) et de l'INEAC (SYS *et al.*, 1961), et face aux controverses relatives à la genèse, il se pose alors un problème de classification de ces sols. En outre, comme ces sols chimiquement pauvres mais potentiellement intéressants au point de vue agricole sont peu exploités et

occupent d'importantes superficies dans la région de haute altitude densément peuplée, ils doivent faire l'objet d'une étude approfondie pour prouver des techniques appropriées à leur aménagement (MUTWEWINGABO, 1984).

Les objectifs de cet exposé sont :

- d'étudier les propriétés morphologiques et physico-chimiques de trois toposéquences de sols à horizon sombre de profondeur représentatives de la région de haute altitude du Rwanda où ils sont abondants ;
- de tenter, à l'aide des propriétés trouvées, de préciser laquelle des deux hypothèses relatives à la genèse de ces sols est la plus plausible et s'applique le mieux à ces sols ;
- de proposer une démarche à suivre pour arriver à classer facilement ces sols ;
- de discuter les types d'aménagement possibles, à l'aide des propriétés trouvées et des données d'autres travaux de fertilité et de cartographie réalisés dans la région.

## **I - MATERIEL ET METHODES**

---

### **1.1. Approche scientifique**

Nous avons adopté une démarche toposéquentielle (fig. 2) pour pouvoir comparer les variations morphologiques et physico-chimiques qui se produisent aussi bien à l'intérieur des profils isolés qu'au long de la pente. Trois toposéquences de sols représentatives de la région de haute altitude (1 800 m à 2 800 m) ont été choisies et analysées. Deux autres profils isolés ont été pris dans la région de Butare, à une altitude supérieure à 1 700 m, pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus dans la région de haute altitude.

### **1.2. Situation de sols**

Les trois toposéquences de sols ont été choisies dans la région de Gikongoro, comprise entre 29° 33' et 29° 35' de longitude Est et entre 2° 34' et 2° 38' de latitude Sud. Les deux profils de sols ont été échantillonnés dans la région de Butare, comprise entre 29° 36' et 29° 38' de longitude Est et entre 2° 30' et 2° 34' de latitude Sud.

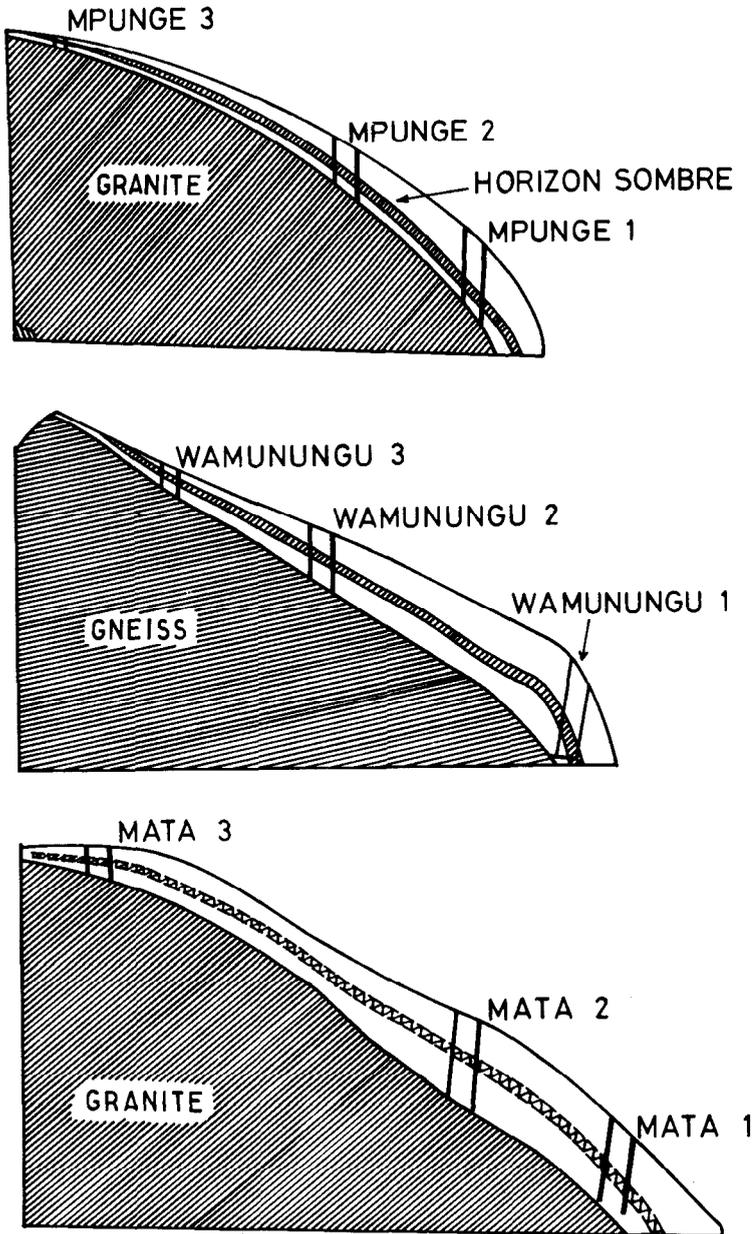


Figure 2 : Situation des profils dans les toposéquences Mpunge, Wamunungu et Mata

La région de Gikongoro jouit d'un climat caractérisé par une saison sèche de 2 à 3 mois (juin, juillet et août), une température moyenne de l'ordre de 18° C et une pluviosité moyenne annuelle de l'ordre de 1 400 mm. Les régimes d'humidité et de température du sol, estimés à partir des données climatiques disponibles de la station la plus proche (station de Mata) sont respectivement udique et isothermique. En milieu tropical, le régime udique signifie que le profil ne se dessèche pas pendant 60 jours consécutifs ou 90 jours cumulatifs à une profondeur de 18 à 50 cm, tandis que le régime de température isothermique signifie que la température moyenne du sol à une profondeur de 50 cm est égale ou supérieure à 15° C, mais inférieure à 22° C, et que la différence de température entre les mois les plus froids et les mois les plus chauds est inférieure ou égale à 5° C.

### **1.3. Caractéristiques géomorphologiques et bioclimatiques**

La région de haute altitude fait partie du vieux socle africain, qui a été probablement remodelé par le système des cassures de l'Afrique de l'Est. Les différentes roches, d'âge précambien, sont très souvent associées et il en résulte une bonne relation entre la dureté des roches dominantes et les formes du relief. Les crêtes vives sont essentiellement formées de grès quartzeux, tandis que les croupes sommitales linéaires ou effilées reposent sur des roches dures diverses qui souvent affleurent en sommet de versant quand la pente devient forte.

La région échantillonnée comprend trois types de collines : les collines à sommets arrondis en forme de dômes, les collines à longues et fortes pentes et à sommets aigus et les collines à croupes arrondies surmontées de petits sommets en pain de sucre. Ces collines, séparées par des vallons de dimensions variables, correspondent à une succession de roches dures (gneiss, granites, quartzites ...) et de roches tendres. Le soubassement de la région est en effet à dominance de granite et gneiss, mais on y observe parfois l'influence d'autres types de roches, telles que des schistes, des micaschistes et des quartzites.

La végétation naturelle est une prairie dominée par l'*Eragrostis*. Les sols cultivés sont généralement ceux des sommets de collines et du haut des versants.

La région de Butare jouit d'un climat caractérisé par une saison sèche de 2 à 3 mois (juin à août), une moyenne de température annuelle de 19° C, une pluviosité totale moyenne de 1 200 mm et une température moyenne annuelle du sol de 21° C. Les régimes d'humidité et de température sont également unique et isothermique.

#### **1.4. Description et analyse physique des sols**

La description des sols a été faite en utilisant la terminologie de la Soil Taxonomy (SCS, 1975). L'analyse granulométrique a été réalisée à l'aide de la méthode modifiée de Bouyoucos sur des échantillons de sols séchés à l'air, broyés sans affecter les particules primaires et passés au tamis 2 mm, et après destruction de la matière organique par le peroxyde d'hydrogène et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium d'une suspension légèrement acidifiée à l'acide chlorhydrique dilué pour rompre les liens sesquioxydiques. La masse volumique apparente sèche a été déterminée. Les indices d'homogénéité du sol, basés sur les fractions granulométriques exemptes d'argile ont été calculés. De même, les indices d'altération, basés sur le rapport limon fin (2 - 20 micromètres) sur argile (< 2 micromètres) ont été calculés.

#### **1.5. Analyses chimiques et physico - chimiques**

Les analyses chimiques ont porté sur les mesures de pH (à l'eau et au KCl), les dosages du carbone organique, de l'azote, des bases échangeables, de l'aluminium extractible au KCl et de la capacité d'échange cationique à l'acétate d'ammonium à pH 7,0. Pour divers types de sesquioxydes de fer et d'aluminium libres, les dosages du fer et de l'aluminium ont été effectués sur les extractions au citrate - dithionite - bicarbonate, au pyrophosphate de sodium 0,1 M et à l'oxalate acide d'ammonium à pH 3. Divers indices, tels que le degré de saturation en bases et en aluminium ont été calculés.

La détermination des caractéristiques de la charge des sols a été faite par la méthode de titration potentiométrique acide-base sur des suspensions de sols de concentrations variables en chlorure de sodium. Les données sur l'adsorption du phosphore

ont été obtenues par la méthode des isothermes d'adsorption du phosphore.

### **1.6. Analyse micromorphologique**

Une analyse micromorphologique détaillée a été faite. Les données recherchées concernaient l'identification et l'organisation des constituants du fond matriciel, les assemblages plasmiques, les traits pédologiques orthiques et hérités ainsi que ceux d'origine biologique. Ces données ont été reliées à celles obtenues à l'échelle macroscopique et aux résultats des analyses physico-chimiques. Les terminologies utilisées sont celles de BREWER (1964), de BREWER et PAWLUK (1975), d'ESWARAN et BANOS (1976) et de FEDOROFF et BULLOCK (1978).

## **II - RESULTATS**

---

### **2.1. Traits macromorphologiques**

Tous les sols ont un horizon sombre de profondeur de morphologie variable. La structure de cet horizon est tantôt granuleuse, tantôt polyédrique angulaire ou subangulaire, avec ou sans revêtements argileux ; elle présente divers degrés de développement. Sa couleur est tantôt homogène, tantôt hétérogène ; elle correspond parfois à celle de l'horizon A de surface ou elle est plus foncée. Les limites de cet horizon sont presque toujours ondulées et interrompues, de sorte que les discontinuités latérales sont fréquentes. Cet horizon contient presque toujours des morceaux de charbon de bois de taille variée. Il renferme fréquemment des agrégats de matériel rougeâtre présentant beaucoup de similitudes avec le matériel des horizons plus profonds et plus particulièrement de l'horizon C.

Du haut en bas d'une colline, les sols deviennent profonds et l'horizon sombre s'enfonce davantage. Les sols des sommets et des versants intensivement cultivés ont un horizon sombre qui, le plus souvent, satisfait aux exigences morphologiques d'un horizon argilique, avec des revêtements argileux bien développés. Par

contre, les sols des sommets et des hauts versants qui sont restés sous prairies ne présentent pas ces caractères.

Dans l'ensemble, on observe une activité biologique intense qui s'étend sur une profondeur considérable, dépassant parfois 150 cm. Cette activité biologique est révélée par de nombreuses galeries d'origine végétale (racines) et animale, comblées par des microagrégats biologiques noirs à brun foncé à assemblage lâche.

## **2.2. Propriétés physiques**

Tous les sols étudiés, excepté le sol Karubanda dérivé d'une roche schisteuse, proviennent de roches-mères essentiellement acides (granito-gneiss ou micaschistes). La teneur en argile est généralement élevée (30 à 70 %). Les tests d'homogénéité des matériaux des sols ont révélé des discontinuités texturales dans tous les profils, par une variation irrégulière des valeurs des indices observée dans chacun des profils. D'après VAN WAMBEKE (1962), un rapport limon fin/argile inférieur à 0,15 sur roche ignée ou métamorphique reflète une altération ferrallitique très poussée, tandis que les valeurs de ce rapport supérieures à 0,15 pour les sols dérivés de ces mêmes roches laissent envisager des quantités appréciables de minéraux altérables. D'après les valeurs calculées de cet indice, la majorité des sols étudiés ont une altération ferrallitique intense, et ceux situés en position intermédiaire des versants sont généralement les plus altérés. Certains sols des sommets et des piémonts ont tendance à contenir des limons en quantité relativement élevée, entraînant ainsi les valeurs du rapport limon fin/argile supérieures à 0,15.

## **2.3. Propriétés chimiques**

Les sols étudiés, à l'exception du sol Karubanda dont le pH à l'eau varie de 5,20 à 5,50, sont très fortement acides. Les valeurs du pH à l'eau varient de 4,30 à 4,90, et celles du pH au KCl 1 N varient de 3,60 à 4,80. L'abaissement par le chlorure de potassium des valeurs du pH de ces sols donne ces valeurs de  $\Delta$  pH négatives variant d'une demi-unité à plus d'une unité (-0,5 à -1,2). Ces valeurs  $\Delta$  pH négatives sont attribuables à la matière organique. Les valeurs de pH mesurées dans une solution normale de fluorure de sodium (rapport sol/solution de

1/50) après un contact de 2 minutes varient de 7,0 à 10,0 et, dans tous les cas, les valeurs de pH mesurées dans ce même électrolyte après un contact de 60 minutes excèdent celles obtenues après deux minutes. La majorité des horizons sombres donnent des valeurs de pH au NaF supérieures à 9,40, valeur qui suggère la présence d'un matériau allophanique ou de composition semblable, ce qui a certainement un impact sur la rétrogradation de certains éléments apportés au sol, notamment le phosphore.

Tous ces sols de haute altitude sont très riches en matière organique. La teneur en matière organique varie de 2 à 5 % dans les 30 premiers centimètres des sols et la pénétration de la matière organique est tellement profonde que le taux se maintient au dessus de 1 % jusqu'à une profondeur de 1 mètre, ce qui représente plus de 10 kg de carbone organique par mètre cube dans le premier mètre. Cette pénétration profonde de la matière organique résulte en partie d'une activité biologique intense.

Les valeurs du rapport C/N sont généralement inférieures à 10, avec une teneur en azote qui varie de 0,10 à 0,40 %. Les très faibles valeurs de ce rapport sont liées au degré de décomposition élevé de la matière organique, et elles suggèrent qu'au cours des processus d'humification il y a production et accumulation de substances azotées.

Les teneurs en bases échangeables sont extrêmement faibles : elles sont généralement inférieures à 1 mé/100 g de sol. Par contre, dans les sols intensivement cultivés (sols anthropisés), et plus particulièrement sous bananeraie, il y a une saturation du complexe adsorbant, suite à une fumure régulière, de sorte que les bases échangeables et la capacité d'échange cationique augmentent de façon considérable, en même temps que le pH du sol. Les faibles teneurs en bases échangeables des sols sous *Eragrostis* reflètent une altération intense de ces sols et un lessivage poussé des bases sous l'effet des fortes précipitations. La très forte acidité de ces sols induit une teneur élevée en aluminium échangeable, qui atteint le plus souvent 3 à 4 mé/100 g de sol. Le degré de saturation en cet élément excède souvent 80 %. Ces sols accusent en outre des déficiences en certains éléments comme le phosphore.

Les valeurs de la capacité d'échange cationique (déterminée par l'acétate d'ammonium à pH 7) sont de loin plus élevées que celles déterminées par une solution normale de chlorure d'ammonium non tamponnée, mais elles dépassent rarement 35 mé/100 g d'argile. Les valeurs de la capacité d'échange cationique effective, considérée comme étant la somme des bases échangeables et de l'aluminium extractible par une solution normale de KCl, dépassent rarement 10 mé/100 g d'argile.

#### **2.4. Formes du fer et de l'aluminium**

Nous avons également étudié les formes du fer et de l'aluminium présentes dans ces sols. Pour cette étude, nous avons utilisé trois réactifs, considérés comme sélectifs dans l'extraction des divers composés de fer et d'aluminium dans les sols. Ces réactifs sont le dithionite - citrate bicarbonate (DCB), l'oxalate acide d'ammonium à pH 3,0 et le pyrophosphate de sodium 0,1 M à pH 10.

Théoriquement, le réactif DCB est supposé extraire toutes les formes de fer (hématite, goethite) et d'aluminium cristallines et les formes amorphes inorganiques et organiques de ces deux éléments, tandis que l'oxalate acide d'ammonium à pH 3 est supposé ne dissoudre que les produits amorphes de fer et d'aluminium inorganiques et organiques (Mc KEAGUE et DAY, 1966 ; BLUME et SCHWERTMANN, 1969) ; Le pyrophosphate de sodium est supposé n'extraire que le fer et l'aluminium liés à la matière organique.

Ainsi, théoriquement le réactif DCB devrait extraire plus de fer et d'aluminium que l'oxalate acide d'ammonium, de même que celui-ci devrait extraire plus de ces deux éléments que le pyrophosphate de sodium. Ainsi, la différence entre la quantité de fer et d'aluminium extraite par le DCB et celle extraite par l'oxalate acide d'ammonium devrait fournir une estimation de la quantité de fer ou d'aluminium existant sous des formes cristallines, tandis que la différence entre la quantité de fer plus d'aluminium extraite par l'oxalate acide d'ammonium et le pyrophosphate de sodium devrait fournir une estimation de la quantité de ces deux éléments existant sous des formes liées à la matière organique.

*Evaluation des terres pour la mise en valeur*

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que, dans les sols étudiés, la quantité de fer libre extraite par le réactif DCB représente 85 à 100 % de la quantité de fer total obtenu par fusion au métaborate de lithium, ce qui suggère que presque tout le fer et l'aluminium présents dans ces sols sont sous la forme libre. Dans ces sols, le réactif DCB a extrait plus de fer et d'aluminium que l'oxalate acide d'ammonium à pH 3 ou le pyrophosphate de sodium 0,1 M à pH 10, résultats qui semblent normaux.

Par contre, à l'inverse des résultats habituellement obtenus, le pyrophosphate de sodium, qui est sensé n'extraire que les formes du fer et de l'aluminium chélatées ou incorporées dans la matière organique, a extrait dans la plupart des échantillons riches en matière organique plus de fer, et parfois plus d'aluminium, que l'oxalate acide d'ammonium (fig. 3). Ces résultats, qui mettent en cause la spécificité de deux réactifs dans l'extraction du fer libre, peuvent nous éclairer quant à la nature de la matière organique dans ces sols.

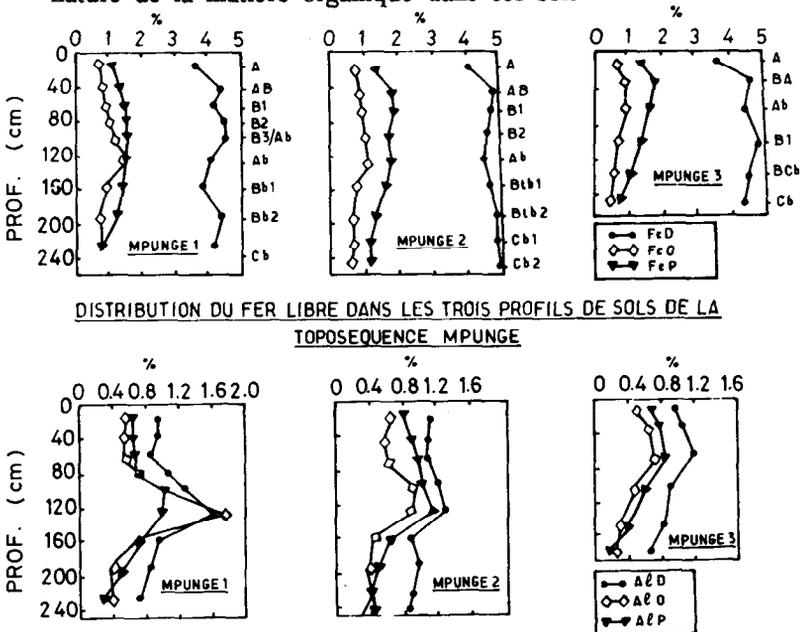


Figure 3 : Distribution de l'aluminium libre dans les trois profils de sols de la toposéquence Mpunge

D'après ces résultats, l'oxalate acide d'ammonium à pH 3 n'extrait pas la totalité des oxydes de fer et d'aluminium liés à la matière organique. L'inefficacité de ces réactifs proviendrait du fait que le fer et l'aluminium seraient plutôt associés aux acides humiques qu'aux acides fulviques, les premiers étant solubles dans les solutions acides. En effet, dans un milieu où la quantité d'acides humiques serait aussi importante que celle d'acides fulviques, le pyrophosphate de sodium 0,1 M à pH 10 serait plus efficace que l'oxalate acide d'ammonium dans l'extraction des formes du fer et de l'aluminium complexés ou incorporés à la matière organique. Cette efficacité du pyrophosphate de sodium 0,1 M à pH 10 proviendrait donc à la fois de son alcalinité, qui permet de garder en solution tout aussi bien les acides humiques que les acides fulviques, et de son pouvoir complexant, qui permet le maintien du fer et de l'aluminium chélatés en solution.

Ainsi, d'après ces résultats, la matière organique des sols de la région concernée serait plus composée d'acides humiques que d'acides fulviques. Si c'est le cas, cela signifierait que cette matière organique est très fortement polymérisée, ce qui limiterait les possibilités de minéralisation et donc de contribution à la nutrition des plantes.

## **2.5. Propriétés de charge**

Les propriétés de charge de certains échantillons provenant des horizons A de surface, des horizons B et des horizons sombres de profondeur ont été étudiées à l'aide de titrations potentiométriques acide-base (HCl et NaOH) de suspensions de sol de concentration variable en NaCl (0,1 N, 0,01 N et 0,001 N). La méthode utilisée est celle de BLOCK et de BRUYN (1970). Trois types de courbes de titration potentiométrique ont été obtenus, mais celui caractérisé par un point de charge zéro (PCZ) clairement défini par le point commun d'intersection des trois courbes de titration potentiométrique a été le plus fréquent et même s'est retrouvé dans au moins un horizon de chacun des profils étudiés (fig. 4). Il indique, au moins de façon qualitative, que le comportement électrochimique de ces sols est quasi identique à celui des oxydes métalliques pour lesquels le potentiel de surface de la double couche réversible est uniquement déterminé par l'activité

des ions  $H^+$  et  $OH^-$  appelés ions déterminant le potentiel. Un tel comportement a révélé la prédominance dans ces sols d'une charge variable, comportement qui peut être approximativement décrit par les équations mathématiques de Nernst et Gouy-Chapman (VAN RAIJ et PEECH, 1972).

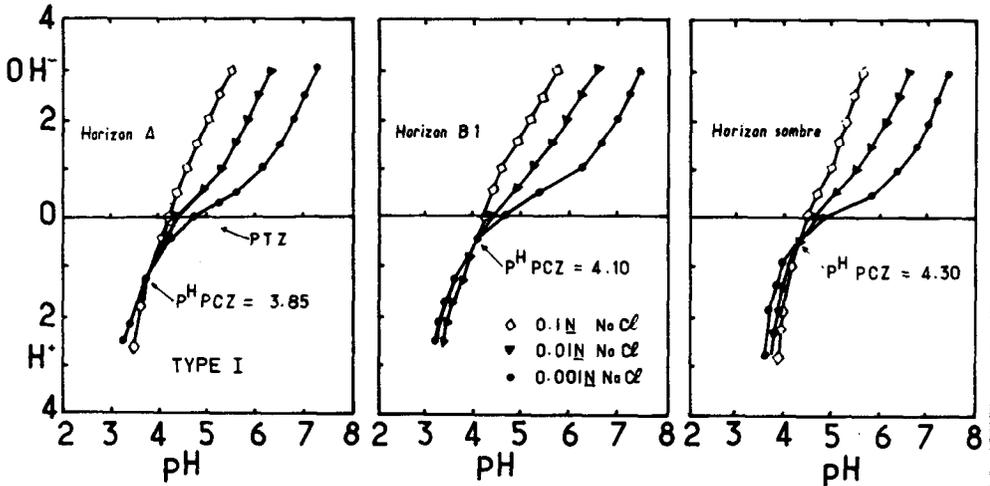


Figure 4 : Courbes de titration potentiométrique des horizons A, B1 et sombre (Ab) du profil Mpunge 1

Le pH au point de charge zéro est une valeur unique, indépendante de la concentration de NaCl, et à laquelle le signe de la charge nette change. Pour une valeur donnée de pH, située du côté alcalin de pH et PCZ, la quantité d'ions  $OH^-$  adsorbés (charge négative) augmente avec la force ionique de la suspension. De la même façon, pour une valeur de pH située du côté acide du pH au PCZ, l'accroissement de la force ionique de la suspension tend à augmenter l'adsorption des ions  $H^+$  (charge positive). Toutefois, il y a lieu d'observer un phénomène particulier à ces sols : le rapprochement des trois courbes de titration potentiométrique observé au côté acide de PCZ résulte du pouvoir tampon élevé de ces sols, dû à leur richesse en aluminium soluble en milieu extrêmement acide.

Les valeurs  $\Delta pH_{PCZ}$  (Tableau 1) obtenues par la différence entre le pH au KCl et le pH au PCZ ont été utilisées comme critères d'évaluation du degré d'évolution des sols (HENDERSHOT *et al.*, 1978 et 1979). Les faibles valeurs de ce

*Les sols à horizon sombre du Rwanda*

critère qui ont été obtenues rendent bien compte du degré d'altération élevée de ces sols et de la nature des constituants de la fraction colloïdale, essentiellement constituée de kaolinite et d'oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium.

Tableau 1 - Valeurs de C,  $pH_{PCZ}$ , charge permanente, et  $\Delta pH_{PCZ}$

Horizon	C	$pH_{PCZ}$	Charge permanente mé/100g	$pH_{PCZ}$
MPUNGE				
A	2,41	3,85	- 1,10	- 0,05
B1	1,22	4,10	- 0,50	- 0,30
AB	2,17	4,30	- 0,50	- 0,40
WAMUNUNGU 3				
Ap	1,15	IND.	-	-
Bt	0,55	3,65	- 0,80	0,05
AB & Btb1	0,24	3,45	- 1,20	0,35
KARUBANDA				
Ap1	2,13	4,20	- 2,45	0,40
Bt	1,58	IND.	-	-
AB1 & Btb1	1,03	IND.	-	-

Toutefois, si les valeurs du pH des sols au PCZ qui ont été déterminées varient de 3,45 à 4,20 et sont de loin inférieures à celles généralement rapportées pour les hydroxydes cristallins de fer et d'aluminium purs (de l'ordre de 8 à 10,2, selon HENDERSHOT et LAVKULICH, 1983), elles pourraient être expliquées par une teneur élevée de matière organique de ces sols (VAN RAIJ et PEECH, 1972 ; KENG et UEHARA, 1974). En effet, la matière organique ayant une valeur de pH au PCZ de l'ordre de 2 à 3, elle contribue à l'abaissement du point de charge zéro et par conséquent à l'augmentation de la charge permanente. Il est à remarquer que malgré la teneur élevée de matière organique de ces sols, la charge permanente calculée est très faible (elle varie de -0,50 à -2,45 mé/100 g de sol). Ces faibles valeurs font présumer un lessivage très rapide des cations ajoutés à ces sols et une forte adsorption des anions (en particulier du phosphate). Ces résultats entraînent une

problématique quant à la mise en valeur de ces sols. D'une part ils sont très riches en matière organique, mais d'autre part ils ont une charge permanente très faible. Or théoriquement, pour améliorer leur charge, il faudrait d'abord conserver ou augmenter le taux de matière organique et ensuite chauler pour accroître le pH à une valeur au moins de l'ordre de 5. Cette valeur permet d'inhiber la présence de l'aluminium soluble qui, non seulement à certaines concentrations peut être toxique pour certaines cultures, mais qui joue également un rôle primordial dans la fixation du phosphore dans ces sols. En réalité, que se passe-t-il ? Voici une question dont nous discuterons au chapitre de l'aménagement de ces sols.

## **2.6. Comportement du phosphore**

Les sols à horizons sombres de profondeur étant reconnus pour leurs déficiences en phosphore et pour leur capacité élevée de fixation de cet élément, des études relatives à l'adsorption du phosphore ont été réalisées à l'aide des méthodes des isothermes d'adsorption. Les résultats de ces études montrent que ces sols adsorbent des quantités considérables de phosphates. Les adsorptions maximales de phosphore, calculées à l'aide de l'équation de Langmuir, varient de 1 500 à 17 000 microgrammes de phosphore par gramme de sol.

De même, à l'aide des isothermes d'adsorption tels que ceux utilisés par FOX et KAMPRATH (1970), les quantités de phosphore à ajouter au sol pour avoir une concentration de 0.2 ppm dans la solution du sol (quantités généralement considérées comme étant optimales pour assurer le plein développement végétatif de la plupart des plantes cultivées, Cf. BECKWITH, 1965) sont élevées ; elles varient de 200 à 1 000 microgrammes de phosphore par gramme de sol, avec une moyenne de 400 microgrammes de phosphore par gramme de sol, ce qui équivaut à une moyenne de 800 kg de phosphore par hectare ou environ 1 800 kg de  $P_2O_5$ /ha.

D'après l'échelle de JUO et FOX (1977), fondée sur la quantité de phosphore nécessaire pour atteindre la valeur de 0,2 ppm de phosphore dans la solution du sol, les sols de cette région de haute altitude appartiennent à des catégories qui fixent des quantités moyennes à très élevées de phosphate. Ces résultats

suggèrent encore une fois que la fraction argileuse de ces sols contient essentiellement des minéraux argileux de type kaolinite, des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que des matériaux amorphes désilicatés (allophanes), qui ont un pouvoir fixateur pour le phosphore élevé.

## **2.7. Micromorphologie**

### **2.7.1. Sols de Gikongoro**

L'étude micromorphologique des sols échantillonnés dans la préfecture Gikongoro a révélé un certain nombre de caractéristiques très variées et très significatives.

Dans l'ensemble, ces sols sont caractérisés par une altération ferrallitique intense, mais celle-ci est, plus prononcée dans la partie supérieure des profils où l'on n'observe que des traces de plagioclases et de très faibles quantités de fines paillettes de muscovite. Les biotites ont été complètement altérées. Le squelette est essentiellement constitué de nombreux grains de quartz ; ces grains sont généralement corrodés, carriés, fracturés ou microfissurés, et certains présentent des microfissures remplies de plasma sesquioxydique, opaque en lumière polarisée non analysée (LPNA). Des grains de quartz qui présentent de telles caractéristiques sont des "runiquartz", d'après la terminologie d'ESWARAN et SYS (1975). La quantité de ces "runiquartz" varie selon les horizons dans chacun des profils.

Le plasma varie verticalement au point de vue de sa composition et de son organisation. Les horizons A superficiels et les horizons sombres de profondeur ont une matrice organo-minérale abondante, qui s'organise différemment dans ces deux horizons. Le plasma des horizons sombres de profondeur a tendance à flocculer, à s'agréger et à former une microstructure granuleuse ou spongieuse de type congélique (selon ESWARAN et BANOS, 1976), ce qui n'est pas le cas des horizons A superficiels.

Les horizons B situés au-dessus de l'horizon sombre de profondeur ont généralement deux phases matricielles : une phase jaune-rouge qui l'emporte sur la phase brun-rouge enrichie en matière organique. Cette phase jaune-rouge est caractérisée par de nombreuses micro-inclusions sesquioxydiques, responsables de son aspect poussiéreux lorsqu'elle est observée en LPNA à de forts grossissements. La majorité de ces micro-inclusions sesquioxydiques sont rougeâtres en LPA sous de fortes intensités lumineuses, et ont le plus souvent une forme globulaire ou sphéroïdale. Cette phase se retrouve dans certains horizons sombres de profondeur, en quantités limitées, sous forme de plages.

Dans les horizons B et C sous-jacents à l'horizon sombre, la diminution marquée des substances humiques s'accompagne d'une disparition presque complète de la phase brun-rouge foncée. Dans ces horizons profonds, on observe un véritable saupoudrage, au sein de la matrice, de micro-inclusions ferrugineuses contrastées et bien striées, à côté desquelles se trouvent de nombreux micro-nodules ferrugineux de diamètre variant entre 5 et 150 micromètres, et d'autres concentrations sesquioxydiques sous forme de nodules ou de sesquanes, sous forme d'amas dans la matrice, ou infiltrées à l'intérieur de microfissures dans certains quartz.

Ces sols sont caractérisés par une porosité très variable selon les horizons. Les horizons superficiels et les horizons sombres de profondeur sont très microstructurés et ont une porosité d'entassement composé. Les autres horizons sus et sous-jacents à l'horizon sombre de profondeur ont essentiellement une porosité constituée de cavités, de chenaux et de fentes.

L'organisation habituelle des constituants du sol est plasmique-porphyrrique, sauf dans les horizons A de surface et sombres de profondeur où l'on observe parfois le type grani-porphyrrique. Par contre, les modèles de distribution relative spécifiques résultant des processus pédogénétiques sont complexes et varient selon les horizons. On trouve des associations d'unités matrigraniques, matrifrag-

## Les sols à horizon sombre du Rwanda

moïdiques, matrigranoidiques ou même humimatrigraniques ou granoïdiques selon les horizons.

Ces sols présentent une faible expression des assemblages plasmiques dans la partie supérieure des profils, alors que ceux-ci sont plus variés et plus développés en profondeur, la quantité élevée de substances humiques masquant les séparations plasmiques (le plasma est isotique). Dans les autres horizons, sus et sous-jacents à l'horizon sombre, on observe des assemblages sépiques, dont les plus importants sont ooïdsépiques, masépiques et lattisépiques, les deux derniers étant plus développés dans la partie inférieure des profils. L'assemblage ooïdsépique est observé dans l'ensemble des horizons des profils, sous forme d'orientations plasmiques circulaires ou ovoïdes bordant la face des microagrégats et même de certaines papules, ou marquant une discontinuité, non visible en lumière naturelle, avec le fond plasmique adjacent.

Dans la partie supérieure des profils des sols sous *Eragrostis*, il n'existe aucune preuve d'illuviation de l'argile. Ce n'est qu'à partir d'une profondeur d'environ 150 cm que l'on observe des accumulations texturales (essentiellement argileuses), qui apparaissent sous forme de cutanes simples ou de cutanes composés de types variés :

- ferriargilanes homogènes, jaune-orange, sans micro-inclusions ferrugineuses, apparaissant sous formes de revêtements ou de dépôts comblant partiellement ou totalement les vides ;
- ferriargilanes microlités à nombreuses micro-inclusions sesquioxydiques ;
- ferriargilanes et argilanes de vides en voie de fragmentation ;
- ferriargilanes complexes, souvent microlites, avec alternance de microlités rouges et jaunes, d'argilanes, sesquantes et siltanes.

Par contre, dans les sols cultivés, particulièrement ceux du haut ou de la partie intermédiaire des versants, on observe un développement des horizons argiliques immédiatement en dessous de l'horizon A superficiel.

L'horizon sombre est en même temps un horizon argilique pourvu d'importantes accumulations argileuses (ferriargilanes) et limono-argileuses (siltanes-ferriargilanes). De très rares organo-ferriargilanes ont également été observés.

Enfin, ces sols présentent quelques traits morphologiques particuliers, comme des lithoreliques à assemblage masépique bien développé et de nombreux pédotubules.

L'interprétation des traits pédologiques de ces sols permet de parvenir aux conclusions suivantes. L'existence des "runiquartz" dans certains horizons et leur absence dans d'autres confirme la présence de discontinuités dans les matériaux.

Par ailleurs, l'interprétation de l'assemblage oïdsépique est rendue difficile par le nombre varié de processus qui peuvent contribuer à son développement, bien qu'ils puissent coexister dans ces sols. Cet assemblage est souvent interprété comme une caractéristique des sols très altérés (ESWARAN et SYS, 1976), comme le résultat de l'activité faunique (VERHAYE et STOOPS, 1975) ou tout simplement comme étant relié au phénomène de microagrégation du sol, phénomène qui est parfois favorisé par le transport des matériaux par l'érosion (BUOL et ESWARAN, 1977). Cet assemblage plasmique, qui parfois se manifeste sous forme de séparations plasmiques ovoïdes ou circulaires délimitant des anneaux concentriques plus ou moins emboîtés les uns dans les autres pourrait donc être le résultat de la rotation de microagrégats ou de grains squelettiques à l'intérieur d'une matrice argileuse. Cette rotation aurait donc favorisé l'enrobage de ces microagrégats ou de ces grains squelettiques par plusieurs pellicules argileuses successives. Deux ou plusieurs pellicules argileuses pourraient donc signifier une reprise de l'agrégat ou du noyau squelettique deux ou plusieurs fois.

La confrontation de tous les traits pédologiques observés dans l'ensemble des sols de Gikongoro a donc mis en évidence un remaniement intense des sols, remaniement

prouvé entre autres par les débris d'argilanes (papules) à divers stades d'intégration dans le fond matriciel des horizons et à l'intérieur des volumes pédotubuliques, la rotondité des agrégats qui ne peut résulter que du mouvement rotatoire au cours du malaxage du sol, les lithoreliques arrachées par l'érosion et mélangées au sol, et enfin de nombreux pédotubules résultant d'une activité faunique intense.

### **2.7.2. Sols de Butare**

En vue de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus dans la région de Gikongoro, deux profils supplémentaires ont été analysés dans la région de Butare. Contrairement aux sols de Gikongoro, la translocation de l'argile est un processus important dans l'ensemble de ces sols. Une caractéristique importante observée dans l'un des profils est la présence de divers types de cutanes complexes d'illuviation dans l'horizon sombre, qui est en même temps un horizon argilique. Il s'agit :

- de ferriargilanes épais, microlités ou pas, avec ou sans micro-inclusions ;
- de ferriargilanes complexes zonés et lités, constitués d'une alternance de lits, les uns argileux, les autres argilo-humiques. Par ailleurs, certains argilanes observés dans cet horizon ne sont pas du tout teintés de matière organique. Comme dans les sols de Gikongoro, les horizons inférieurs à l'horizon sombre sont caractérisés par des séparations plasmiques ooidsépiques, masépiques et lattisépiques bien développées et renferment des ferriargilanes d'illuviation souvent complexes, microlités avec ou sans microinclusions ferrugineuses. De plus, le nombre de papules est important. Des "runiquartz" sont présents dans certains horizons d'un profil donné et absent dans d'autres.

L'interprétation des données micromorphologiques des sols étudiés à Butare a conduit aux conclusions suivantes. La morphologie des cutanes présents dans les divers horizons de ces sols indique une translocation importante de l'argile et de la matière organique et suggère que

l'horizon sombre n'est pas un horizon enterré. Par contre, la présence des "runiquartz" suggère la nature transportée du matériel, tandis que les papules imprégnés par des sesquioxides et localisés dans les horizons profonds seraient des reliques. De même, le microlitage de cutanes de nature différente (microlits argileux, microlits argilo-humiques, microlits limoneux) suggère des phases différentes dans le développement des sols. Certains cutanes non teintés de matière organique dans les horizons supérieurs à l'horizon sombre et dans celui-ci seraient postérieurs à la formation de l'horizon sombre. La superposition de tous ces traits pédologiques indique donc plusieurs phases de développement des sols (sols polyphasés).

### **2.7.3. Conclusion**

L'étude micromorphologique des onze profils analysés a mis en évidence plusieurs traits pédologiques que l'analyse macroscopique ne peut déceler. La majorité d'entre eux sont souvent superposés et entrecroisés, de sorte qu'il est presque impossible de les classer par ordre chronologique. L'analyse de tous ces traits a toutefois révélé un remaniement intense des profils par les processus de bio et de pédoturbation, érosion comprise, et plusieurs phases de développement des sols (sols polyphasés).

Dans la recherche d'une explication à la genèse de l'horizon sombre de profondeur, la confrontation des données macro et microscopiques a mis en évidence plusieurs phénomènes qui plaident en faveur d'un ancien horizon A de surface enfoui, qui dans la plupart des cas a été fortement réorganisé par des processus pédologiques et a acquis les caractéristiques d'un horizon B illuvial.

Les arguments en faveur d'un horizon A enfoui sont notamment :

- l'existence au sein de cet horizon, partout où il se rencontre, de morceaux de charbon de bois de taille variée qui ne peuvent être que le résultat d'une combustion ;

### *Les sols à horizon sombre du Rwanda*

- la présence d'agrégats rougeâtres qui présentent de fortes similitudes avec le matériel de l'horizon C, et qui sont interprétés comme ayant été introduits dans cet horizon par l'érosion ;
- les discontinuités latérales de cet horizon.

Toutefois, si nous avons privilégié cette hypothèse, plusieurs caractères compliquent l'histoire de la genèse de ces sols. C'est le cas des cutanes d'illuviation complexes microlités ou zonés avec certaines zones assombries par de la matière organique. Ces zones de matière organique en alternance avec les phases d'illuviation d'argile pure plaident en faveur d'horizon sombre d'illuviation de la matière organique. Dans certains profils, et particulièrement ceux de Butare, si l'horizon sombre est un horizon génétique formé par l'illuviation de la matière organique, il ne se serait cependant pas formé par des processus pédologiques actuels ; il appartiendrait donc à une pédogénèse révolue (Cf. cutanes d'argile récents non teintés de matière organique dans les horizons sombres et dans les horizons sus-jacents des sols où le caractère illuvial de la matière organique apparaît).

D'autres caractères rendent difficile l'interprétation de la genèse de cet horizon. Il s'agit notamment de certaines de ses propriétés chimiques, qui contrastent avec celles de l'horizon A de surface. Parmi les propriétés particulières à cet horizon, on trouve l'augmentation par rapport aux horizons sus et sous-jacents des teneurs en fer et en aluminium extractibles par l'oxalate acide d'ammonium ou par le pyrophosphate de sodium 0,1 M ainsi que les valeurs du pH au NaF souvent supérieures à 9,40.

Compte tenu d'autres interprétations possibles pouvant mener à une conclusion différente de la nôtre, des recherches supplémentaires, telles que la datation de la matière organique au carbone 14 et des études géomorphologiques détaillées de la région, s'avèrent nécessaires pour confirmer ou infirmer les résultats de notre étude.

### III - DEMARCHE PROPOSEE POUR CLASSER CES SOLS

---

L'hypothèse à laquelle nous sommes arrivés crée une controverse, car d'après la carte des associations des sols du Rwanda et du Burundi levée par VAN WAMBEKE (1963) et d'après les travaux d'autres chercheurs (NEEL, 1968), la région échantillonnée est reconnue comme étant celle des sols à horizon sombre. Etant donné la définition de l'horizon sombre adoptée par l'INEAC (SYS *et al.*, 1961) et par les auteurs de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975), les sols étudiés, qui ont des horizons foncés considérés comme étant des horizons A enfouis, ne devraient pas être classés parmi les sols à horizon sombre de ces classifications. Il faut donc proposer une démarche pour pouvoir intégrer ces sols dans les classifications INEAC et Soil Taxonomy.

Il s'avère nécessaire de vérifier par des études micromorphologiques si notre conclusion s'applique à une région beaucoup plus vaste, et même à toute la région des sols à horizon sombre délimitée par l'INEAC en 1954.

Dans le cas où cette conclusion s'appliquerait à toute la région reconnue comme étant celle des sols à horizon sombre, le problème de la classification de ces sols peut être résolu en modifiant simplement la définition de l'horizon sombre (suppression de l'aspect génétique). La définition proposée est la suivante :

"L'horizon sombre est un horizon minéral, de profondeur, noir, brun-gris ou brun-foncé, formé par l'accumulation de la matière organique et rencontré dans des sols naturellement bien drainés des régions tropicales et subtropicales. Il possède une luminosité (value) et/ou une saturation (chroma) de la couleur inférieure à celle des horizons immédiatement sus et sous-jacents. Par rapport à ces derniers horizons, il accuse en général une augmentation en carbone organique, mais ce critère n'est pas absolu".

Dans le cas où notre conclusion ne s'appliquerait qu'à une région importante, mais pas à toute la région reconnue comme étant celle à horizon sombre, il deviendrait nécessaire, pour pouvoir classer ces sols, d'ajouter dans la Soil Taxonomy et dans la classification de l'INEAC un certain nombre de critères permettant d'inclure les sols à horizon foncé qui sont des horizons A enfouis.

#### IV - AMENAGEMENT

---

L'ensemble des sols minéraux de collines non volcaniques des régions de haute altitude du Rwanda, dont les sols à horizon sombre de profondeur constituent la majorité, présente du point de vue agronomique plusieurs caractéristiques géomorphologiques, physico-chimiques et bio-climatiques communes et ont par conséquent les mêmes contraintes d'aménagement. Ces sols, qui occupent environ 30 % de la superficie de terres cultivables, se rencontrent dans plusieurs préfectures du Pays. Ils occupent les régions agro-climatiques de la Crête Zaïre-Nil qui s'étend sur les préfectures Gikongoro, Cyangugu, Kibuye et Gisenyi et certaines zones des hautes terres du Buberuka en préfectures de Byumba et Ruhengeri, ainsi que certaines communes en altitude des préfectures Kigali et Gitarama.

Les sols étudiés sont très acides et pourvus de grandes quantités d'aluminium échangeable. Malgré leurs bonnes propriétés physiques, ces sols sont soumis à des contraintes variées qui limitent leur mise en valeur rationnelle : contraintes physiques (relief très accidenté avec des pentes dépassant souvent 45 à 50 %, associé à une pluviosité très élevée, de l'ordre de 1 400 à 1 800 mm par an, entraînant des risques importants d'érosion par ruissellement et par glissement de terrain ainsi que le lessivage des éléments nutritifs solubles, climat froid  $-11$  à  $18^{\circ}\text{C}$  - limitant le nombre de cultures adaptées à la région) ; contraintes socio-économiques (disponibilité limitée d'intrants agricoles tels que les engrais minéraux, la fumure organique, faible revenu des paysans pour se procurer les intrants agricoles nécessaires à la mise en valeur des terres, insuffisance d'information et d'encadrement des agriculteurs quant à l'utilisation judicieuse des divers intrants agricoles) ; contraintes techniques (méthodes modernes peu développées, faible ou non utilisation des engrais, peu de référentiels techniques convaincants en matière de conservation et d'amélioration des terres) ; contraintes naturelles (propriétés physico-chimiques et biologiques des sols médiocres).

Sur le plan physico-chimique, la très forte acidité de ces sols et leur teneur en aluminium échangeable élevée sont parmi les principaux facteurs limitatifs pour la production agricole. La majorité des sols sous *Eragrostis* et sous fougères (deux plantes indicatrices des sols très dégradés), à l'exception de quelques sols anthropisés qui

sont déjà améliorés par l'apport répété de déchets de ferme et qui ont un pH relativement élevé, ont un pH à l'eau souvent inférieur à 4,5, qui par endroits descend jusqu'à des valeurs de l'ordre de 3,5. A ces valeurs l'aluminium apparaît à des teneurs moyennes de 3 à 4 mé/100 g, qui sont considérées comme toxiques pour la plupart des plantes cultivées.

Une si forte acidité des sols entraîne le ralentissement de la vie microbienne, et par conséquent une faible minéralisation de l'azote, en plus d'une diminution de l'assimilabilité de la plupart des éléments essentiels à la plante.

Face à cette très forte acidité et à la présence des teneurs élevées en aluminium échangeable ainsi qu'à la présence d'une charge négative très faible démontrée par l'étude électrochimique, la mise en valeur de ces sols passe par l'augmentation du taux de matière organique (fumier de ferme, compost, engrais verts) et la pratique du chaulage.

Sur la base des valeurs d'aluminium échangeable trouvées, les quantités théoriques (en tonnes/ha) de chaux peuvent être estimées par la formule de KAMPRATH (1970). En équivalent  $\text{CaCO}_3$  en tonnes/ha, il faut 1,65 mé x/100 g de sol pour mener le pH du sol au voisinage des valeurs 5,2 à 5,5, valeurs où la toxicité aluminique est éliminée. Il faudrait de 5 à 6 tonnes, et même jusqu'à 12 à 13 tonnes de  $\text{CaCO}_3$  à l'hectare dans certains cas extrêmes des sols de la Crête Zaire - Nil où la teneur en aluminium atteint 6 à 8 mé/100 g, pour supprimer la toxicité aluminique.

Sachant que la chaux de première qualité produite au Rwanda correspond à 50 % de la chaux pure, la quantité moyenne de chaux requise par hectare pour la majorité des sols serait donc de 10 à 12 tonnes, pour une valeur de 120 000 à 144 000 francs rwandais (1 600 à 1 920 dollars US) au prix de 12 francs rwandais le kilo de chaux.

Toutefois, les premiers essais de fertilité menés sur ces sols depuis 1980 montrent que des quantités de chaux éteinte de qualité moyenne à 50 % de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de l'ordre de 2,5 à 4 tonnes/ha donnent des résultats plus ou moins satisfaisants, du moins pour certaines cultures, notamment la pomme de terre et le blé. Cela peut s'expliquer par le fait que le but du chaulage n'est pas d'amener le

## *Les sols à horizon sombre du Rwanda*

sol à neutralité, mais plutôt de neutraliser l'aluminium échangeable et de prévenir ainsi la toxicité et la forte rétrogradation du phosphore.

Concernant l'apport de la fumure organique dans ces sols, beaucoup de controverses subsistent. Certains se demandent, pourquoi il faudrait effectuer un apport de fumure organique dans des sols où la teneur en matière organique est déjà élevée (2 à 8 % de matière organique dans les 30 premiers centimètres du sol).

Pour nous, cet apport est indispensable pour, non seulement améliorer la charge négative de ces sols à faible activité d'argile, mais aussi pour activer la vie microbienne indispensable à la minéralisation de la matière organique, apparemment inerte dans les conditions actuelles.

A l'aide des isothermes d'adsorption du phosphore, les exigences en phosphore estimées pour atteindre la concentration de 0,2 ppm de phosphore dans la solution du sol ont été en moyenne de 400 microgrammes de phosphore par gramme de sol, ce qui correspond approximativement à 1 800 kg de  $P_2O_5$  par hectare ou 4 tonnes de superphosphate triple, soit une valeur de 120 000 francs rwandais (ou 1 600 dollars US), au prix de 30 francs rwandais par kilo d'engrais.

Des applications en une fois de quantités aussi élevées sont inaccessibles à l'agriculteur rwandais, et l'on peut se poser la question de la rentabilité financière de cette opération. Si l'agriculteur avait les moyens de se procurer les engrais minéraux, la stratégie que l'on pourrait adopter consisterait, à fractionner cette dose moyenne de 1 800 kg de  $P_2O_5$  et d'appliquer annuellement une dose de 450 kg de  $P_2O_5$  par hectare, dont 150 kg en bandes et 300 kg à la volée, jusqu'à atteindre sur une même parcelle un total d'au moins 1 800 kg de  $P_2O_5$  en 4 ans. L'avantage d'une application à la volée est d'homogénéiser la concentration de l'engrais dans l'espace de toute la couche de sol exploitable par les racines des plantes, tandis que celui d'appliquer en bandes est de s'assurer que la plante reçoit effectivement suffisamment d'engrais appliqué dès le démarrage.

Les sols acides des régions de haute altitude accusent des déficiences non seulement en phosphore, mais aussi en potassium, azote et magnésium. Compte tenu du rôle primordial de l'azote et de ces

*Evaluation des terres pour la mise en valeur*

autres éléments dans la production végétale, une formule d'engrais comprenant les éléments N-P-K et Mg serait souhaitable. Malheureusement les doses optimales de ces trois éléments, chacun pris individuellement, sont pour le moment inconnues. Des expérimentations sont nécessaires, avec des protocoles qui permettront d'établir les courbes de réponse pour chacun de ces éléments et d'évaluer la quantité optimale à appliquer sur les différentes cultures.

Avant de conclure, nous avons jugé important de donner à titre d'exemple quelques résultats obtenus à l'aide d'essais préliminaires d'interactions de fumure organique (doses 0, 6, 12 et 18 t/ha), d'engrais minéral NPK 17-17-17 (doses 0, 0,1, 0,2 et 0,3 t/ha) et de chaux (doses 0, 2, 4 et 6 t/ha) sur la culture de la pomme de terre selon le dispositif en split-split-plot. Les conclusions de l'interprétation des résultats (tableau 2) sont les suivantes :

Tableau 2 : *Expérience factorielle en split-split-plot sur la pomme de terre comportant respectivement fumier, engrais et chaux (4 doses pour chaque traitement) pour 4 répétitions*

Traitements			Rendement	Traitements			Rendement
Fumier	Engrais	Chaux		Fumier	Engrais	Chaux	
t/ha				t/ha			
0	0	0	2	0	0,1	4	9
0	0	2	7	0	0,2	4	11
0	0	4	8	0	0,3	4	11
0	0,1	0	2	6	0,1	0	4
0	0,2	0	3	6	0,2	0	6
0	0,3	0	3	6	0,3	0	6
6	0	0	2	18	0,1	0	5
12	0	0	4	18	0,2	0	6
18	0	0	4	18	0,3	0	8
0	0,1	2	10	6	0,2	2	10
0	0,2	2	11	12	0,2	2	13
0	0,3	2	11	18	0,2	2	15

### *Les sols à horizon sombre du Rwanda*

- l'utilisation de la fumure organiques seule, à des doses inférieures à 20 t/ha/an, est sans effet significatif sur le rendement, sauf pour les sols anthropisés qui sont déjà améliorés par les applications répétées de déchets de ferme par les agriculteurs ;
- l'utilisation de l'engrais minéral NPK 17-17-17 seul, à des doses allant jusqu'à 3 t/ha, est sans résultat et constitue un gaspillage de fonds ;
- l'utilisation de la chaux augmente sensiblement le rendement de la pomme de terre ;
- l'utilisation combinée de la fumure organique et de l'engrais minéral, ou de l'engrais chimique avec la chaux augmente sensiblement le rendement, mais le meilleur rendement est obtenu avec la combinaison de la chaux avec l'engrais ;
- enfin, c'est la combinaison ternaire (fumier, engrais minéral, chaux) qui produit les rendements les plus élevés et les plus économiques.

Concernant les méthodes de fertilisation intégrées avec l'agroforesterie, elles sont loin d'être mises au point dans cette région. Les recherches sur les espèces agroforestières adaptées doivent se poursuivre. Néanmoins, pour produire suffisamment de biomasse sous forme d'engrais verts avec des légumineuses fixatrices d'azote dans ces sols extrêmement acides, un apport de chaux et d'éléments fertilisants (presque équivalent à celui appliqué aux cultures vivrières) est nécessaire.

A ces problèmes de fertilité s'ajoutent ceux relatifs aux aménagements antiérosifs compte tenu des pentes fortes et des conditions de pluviosité élevée favorisant le transport de matières solides par ruissellement, reptation et éboulement de terrain. Trouver les aménagements anti-érosifs appropriés pour lutter au maximum contre les dégâts susceptibles de se produire lors de la mise en culture de ces terres doit constituer une préoccupation majeure pour les chercheurs.

Nous pensons qu'en raison de la susceptibilité au glissement de terrain, les techniques de lutte anti-érosive qui devraient être essayées sont celles qui permettent à l'eau de s'écouler avec la moindre énergie. Ainsi, les associations de cultures, les cultures en bandes alternées, les haies vives unies et bien espacées, l'augmentation de la stabilité structurale par apport de fumier et la jachère sont les plus indiquées. Les recherches doivent donc se

poursuivre pour évaluer correctement l'efficacité des systèmes de fossés aveugles et des terrasses quant au maintien des éléments solides et solubles dans ces sols.

## CONCLUSION

---

L'utilisation d'amendements calcaires s'avère indispensable pour résoudre le problème de l'acidité des sols des régions de haute altitude du Rwanda, qui produit une forte toxicité aluminique. Toutefois, l'utilisation de cet intrant ne doit pas être une finalité en soi : elle doit amorcer la production d'une quantité suffisante de biomasse pour augmenter le taux de matière organique du sol et accroître l'activité biologique. Pour obtenir des rendements élevés, il faut utiliser conjointement la chaux, la fumure organique et les engrais minéraux. Les recherches sur ces sols acides doivent être coordonnées et planifiées. De même, pour une meilleure exploitation des données et les échanges d'expérience, la caractérisation préalable des sites et du matériel d'expérimentation, ainsi que l'emploi des mêmes protocoles est nécessaire, du moins à l'échelle nationale ou régionale. Enfin, la recherche de systèmes de culture tenant compte des fertilisants, des semences sélectionnées et des produits phytosanitaires est recommandée.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- BECKWITH (R.S.), 1965 - Sorbed phosphate and standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. *Austr. J. of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 5 : 52 - 58.
- BLOCK (L.) & DE BRUYN (P.L.), 1970 - The ionic double layer at the ZNO/solution interface.I. The experimental point of zero charge. *J. Colloid. Interface Sci.*, 32 : 518 - 525.
- BLUME (H.P.) & SCHWERTMANN (U.) 1969 - Genetic evaluation of profile distribution of aluminium, iron and manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33 : 438 - 444.

*Les sols à horizon sombre du Rwanda*

- BREWER (R.), 1964 - Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons. New-York, London, Sydney, 470 p.
- BREWER (R.) & PAWLUK (S.), 1975 - Investigations of some soils developed in hummocks of Canadian Sub-Arctic and Southern-Arctic regions. I. Morphology and Micromorphology. *Can. J. Soil Sci.*, 55 : 301 - 319.
- BUOL (S.W.) & ESWARAN (H.), 1977 - The micromorphology of oxisols. In Proceedings of the Vth international Working meeting on soil micromorphology. Granada, Espania, 1978, pp. 325 - 347.
- ESWARAN (H.) & BANOS (C.), 1976 - Related distribution patterns in soils and their significance. *Anales Edof. y Agrobiol.*, 35 : 33 - 45.
- ESWARAN (H.) & SYS (C.), 1975 - A pedogenetical study of soils developed on ultrabasic rocks from Sabah, Malaysia. Proc. 4th ASEAN Soil Conf. Kuala Lumpur, Malaysia.
- ESWARAN (H.) & SYS (C.), 1976 - Micromorphological and mineralogical properties of the Quoin Hill toposequence. *Pédologie*, 26 : 280 - 291.
- FEDOROFF (N.) & BULLOCK (P.), 1978 - Principes et méthodologie de la description microscopique des sols. Congrès de micromorphologie des sols. Grenade. pp. 59 - 72. Vol. I. Micromorphologia de Suelos. Proc. V. Int. Work. Meet. Soil micromorphology. Granada.
- FOX (R.L.) & KAMPRATH (E.J.), 1970 - Phosphate sorption isotherms for evaluating the P requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34 : 902 - 907.
- FRANKART (R.), 1981 - Les sols à horizon sombre du Rwanda et du Burundi. Communication à la 4ème Conférence internationale sur les sols, tenue au Rwanda du 2 au 12 juin 1981.
- HENDERSHOT (W.H.) & LAVKULICH (L.M.), 1978 - The use of ZPC to assess pedogenic development - *Soil Sci. Am. J.*, 43 : 468 - 472.

- HENDERSHOT (W.H.) & LAVKULICH (L.M.), 1983 - Effect of sesquioxide coatings on surface charge of standard mineral and soil samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47 : 1 252 - 1 260.
- HENDERSHOT (W.H.), SINGLETON (G.A.) & LAVKULICH (L.M.), 1979 - Variation in surface charge characteristics in a soil chronosequence. *Soil Sci. Am. J.*, 43 : 387 - 389.
- I.N.E.A.C., 1954 - Carte provisoire des zones pédologiques : but, programme. Réalisations de l'I.N.E.A.C. Publ. I.N.E.A.C., 100 p.
- JUO (A.S.R.) & FOX (R.L.), 1977 - Phosphate sorption characteristics of some benchmark soils of West Africa. *Soil Sci.*, 124(6) : 370 - 376.
- KELLOGG (G.E.) & DAVOL (F.D.), 1949 - An exploratory study of soil groups in the Belgian Congo. Publ. I.N.E.A.C., Sér. Scient., 46 : 73 p.
- KENG (J.K.C.) & UEHARA (G.), 1974 - Chemistry, mineralogy and taxonomy of oxisols and ultisols. *Soil and Crop Sci. Soc. of Fla. Proc.*, 33 : 119 - 126.
- LEBRUN (J.), 1955 - Comptes rendus des débats. C.V. Ve Congr. Inter. Sci. Sol., Léopoldville, 16 - 21 août 1954, 468 p.
- MC KEAGUE (J.A.) & DAY (J.H.), 1966 - Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.*, 46 : 13 - 22.
- MUTWEWINGABO (B.), 1984 - Pédogenèse et micromorphologie de trois toposéquences de sols à horizon sombre de profondeur de Gikongoro et de deux pédons de Butare (Rwanda). Isothermes et caractéristiques d'adsorption du phosphore par ces sols. Thèse Univ. Laval (Québec).
- NEEL (H.), 1968 - Etude pédologique de Mata. ISAR - RUBONA (Rapport pédologique inédit).

*Les sols à horizon sombre du Rwanda*

- NEEL (H.) & KIMBLE (H.J.M.), PERCRUYSSSEN (J.), ESWARAN (H), 1982 - The sombric horizon in Rwanda, genetic or buried horizon. In Agronomy abstract. Annual meetings. American Society of Agronomy Crop Science. Soc. of America Soil Sci. pp. 235 - 236.
- RUHE (R.V.), 1956 - Landscape evolution in the high Ituri Belgian Congo. Publ. I.N.E.A.C., Série Scient., n° 66, 108 p.
- SOIL SURVEY STAFF, 1975 - Soil Taxonomy : a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agric. Hands n° 436, U.S.D.A. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- SYS (C.), VAN WANBEKE (A.), FRANKART (R.F.), GILSON (P.), JONGEN (P.), PECROT (A.), BERCE (J.M.) & JAMAGNE (M.), 1961 - La cartographie des sols du Congo. Ses principes et ses méthodes. I.N.E.A.C., Ser. Scient., n° 66, 149 p.
- 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 WANBEKE (A.), 1962 - Criteria for classifying tropical soils by age. *J. Soil Sci.*, 13 : 124 - 132.
- VAN WAMBEKE (A.), 1963 - Note explicative de la carte des sols du Rwanda et du Burundi. Publ. I.N.E.A.C. Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi. Bruxelles.
- VERHAYE (W.) & STOOPS (G.), 1975 - Nature and evolution of soils developed on the granit complex in the subhumid tropic (Ivory Coast). II. Micromorphology and Mineralogy. *Pédologie*, 25(1) : 40 - 55.