

INSTITUT DES SCIENCES AGRONOMIQUES DU BURUNDI

I. S. A. BU.



Division de l'Aménagement du Milieu

Note technique

**Mécanismes de pédogenèse acide dans les Régions
Agro-Pastorales d'Altitude du Burundi**

Luc Opdecamp

Résumé

L'acidité différentielle des terres des paysages agro-pastoraux d'altitude du Burundi est analysée sous l'angle pédogénétique. Plusieurs topo-bioséquences sont étudiées dans le Bututsi et à Gisozi. La théorie de l'effet anthropique est remise en cause au profit d'une théorie de paléo-acidification forestière des sols, sur base de bilans en éléments biogènes, des propriétés de la fumure organique, et d'évidences d'aplanissement du paysage sous alternance de paléo-climats secs et humides.

On attire l'attention sur la formation d'hydroxy-polymères amorphes d'aluminium et sur l'évolution minéralogique des argiles en conditions acides, telle qu'observée au Burundi (séquence d'agradation illite ---> vermiculite ---> chlorite aluminique).

Summary

The distribution of soil acidity in the agro-pastoral highlands of Burundi is analysed from a pedogenetic point of view. Several topo-biosequences are studied in the Bututsi region and at Gisozi. The theory of the anthropic effect is challenged by a forest paleo-acidification theory, on the basis of nutrients balance, manure properties and evidences of landscape levelling under alternation of dry and wet paleo-climates.

Attention is paid to the formation of amorphous hydroxy-aluminium polymers and to the mineralogical evolution of clays in acid conditions, as observed in Burundi (aggradation sequence illite ---> vermiculite ---> aluminium interlayered chlorite).

INTRODUCTION

Sous climat humide (P.an.) 1000-1200 mm, maximum 3-4 mois de saison sèche), en bonnes conditions de drainage, la réaction des sols ferrallitiques est normalement acide à très acide. Il en résulte une individualisation plus ou moins forte d'aluminium cationique sur le complexe adsorbant, associée à de faibles concentrations en bases échangeables.

Dans les régions agro-pastorales du Burundi, à des altitudes de 1700 à 2500 m, des sols ferrallitiques, humifères, caractérisent des paysages ondulés à vallonnés, coiffés de crêtes quartzitiques ou de dalles latéritiques. Une vaste formation graminéenne, dominée par Eragrostis olivacea, y est exploitée de manière très extensive par l'élevage, comme simples "parcours" pour les bovins (pseudo-zébus de race Ankole). Disséminées en amont de ces pâturages, de petites exploitations agricoles, de taille moyenne inférieure à l'hectare, se vouent aux cultures vivrières en utilisant la fumure organique produite en stabulation nocturne du bétail.

Un gradient d'intensité de l'utilisation du sol est relevé en fonction de la position topographique. En tête des bassins versants, juste en-deçà des affleurements latéritiques ou quartzitiques, les cultures vivrières dominent les pâturages qui s'étendent jusqu'aux rivières. Souvent, des jachères longues, temporairement cultivées en patate douce, caractérisent la transition entre les parcelles vivrières fumées et les parcours. On peut ainsi identifier des topo-bioséquences de sols.

Dans un pays où la densité de population rurale peut dépasser 500 hab/km², il est surprenant d'observer le maintien d'un couvert graminéen naturel sur de très vastes étendues, évaluées à plus de 500 000 ha.

Une explication pédogénétique a été recherchée à la configuration particulière de l'occupation des terres dans les paysages agro-pastoraux du Burundi, en étudiant les relations entre les propriétés et l'utilisation des sols. De plus, on a tenté d'établir l'évolution minéralogique des argiles dans les conditions de pédogenèse acides rencontrées.

OBSERVATIONS EXPERIMENTALES DANS DES TOPO-BIOSEQUENCES DU BUTUTSI

Au Bututsi, l'une des régions agro-pastorales les plus représentatives du pays, huit topo-bioséquences ont été prélevées à la tarière, aux profondeurs de 7, 33, 59 et 85 cm, en formant des échantillons composites de 5 prises. Chaque séquence est constituée d'une parcelle vivrière régulièrement fumée par le fermier, d'une parcelle de jachère longue non fumée et du pâturage limitrophe de l'exploitation agricole. La figure 1 représente le schéma d'une séquence typique.

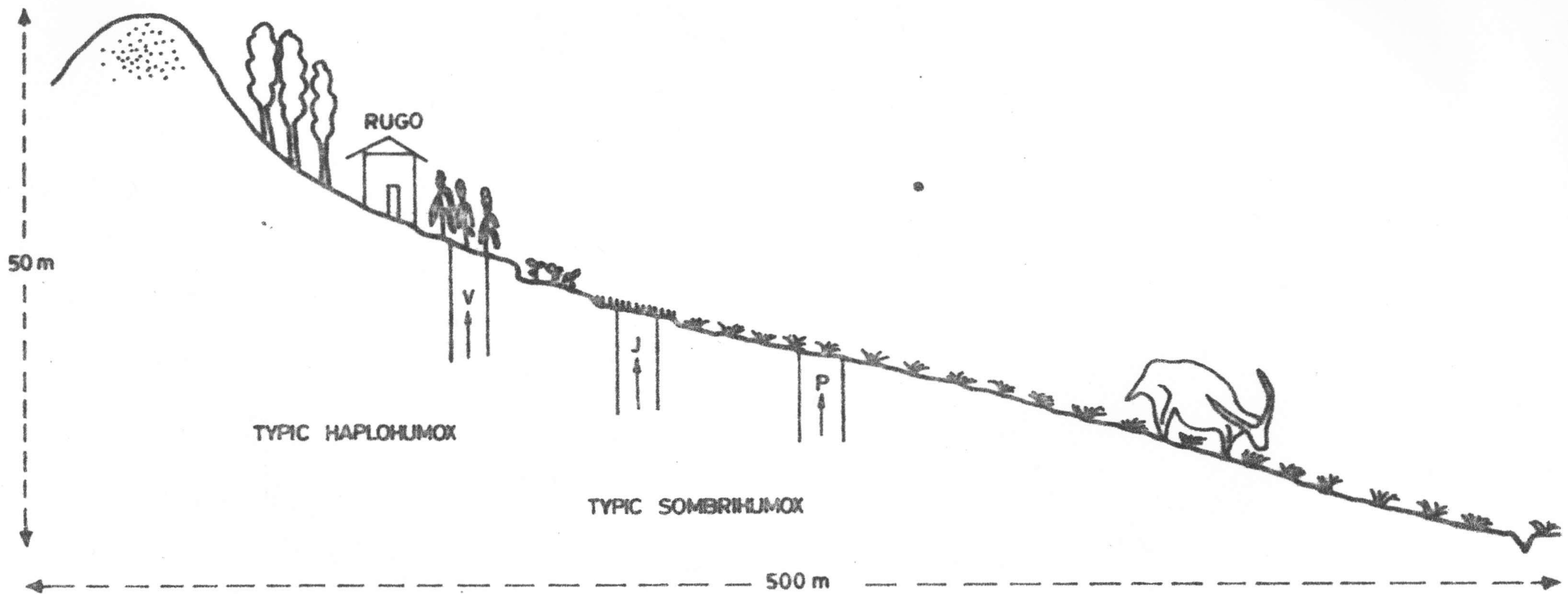


Figure 1 : Représentation schématique d'une topo-bioséquence typique du Bututsi. Distribution des sols selon "Soil Taxonomy"
 Rugo = résidence du fermier, V= parcelle vivrière fumée, J=jachère longue non fumée, P= pâturage naturel

Les sols sont identifiés comme "Kaolisols humifères à horizon sombre, typiques" et "Ferralsols humifères typiques" dans la classification régionale (Tavernier et Sys, 1965). Ils correspondent à des "Typic Sombrihumox" et "Typic Haplohumox" dans la "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1975). Ils sont développés dans un matériau parental argileux (environ 60% d'argile), dérivé de schistes à influence quartzitique. Une profonde imprégnation de matière organique (plus de 20 kg de carbone par m²/m) et la présence locale d'un horizon sombre caractérisent ces sols ferrallitiques.

Dans les séquences étudiées, l'évolution des caractéristiques d'acidité du sol est remarquable. Le tableau I rend compte de l'évolution du pH (H₂O), de l'aluminium échangeable et du taux de saturation aluminique effective du complexe adsorbant (indice "m" de Kamprath) dans les huit topo-bioséquences considérées.

Les pH sont acides à très acides. Les concentrations relatives en aluminium échangeable (indices "m") dépassent systématiquement 60% sur toute l'épaisseur de sol échantillonnée, dans les pâturages et souvent aussi dans les jachères longues. Sous cultures permanentes, l'acidité est moins forte, tant en surface qu'en profondeur, déterminant dès lors de meilleures conditions de fertilité.

Tableau I. Valeurs du pH(H₂O), des teneurs en aluminium échangeable (Al³⁺) et de l'indice "m" pour les parcelles vivrières (V), de jachère longue (J) et de pâturage (P) à 7, 33, 59, et 85 cm de profondeur, dans les séquences du Bututsi.

Séquence	Profondeur cm	pH(H ₂ O)			Al ³⁺ méq/100gr			m		
		V	J	P	V	J	P	V	J	P
1	7	5.1	4.6	5.2	0.70	1.55	1.84	16	74	65
	33	4.9	4.9	5.0	1.66	1.43	2.21	60	80	73
	59	5.1	5.1	5.1	1.04	0.92	1.80	46	81	83
	85	5.1	5.1	5.2	0.60	0.77	1.32	34	77	73
2	7	5.0	4.5	5.2	0.43	1.93	1.84	11	72	65
	33	5.0	4.9	5.0	0.88	2.09	2.21	25	82	73
	59	4.9	5.0	5.1	1.17	1.57	1.80	43	79	83
	85	5.2	5.3	5.2	0.44	0.61	1.32	25	43	73
3	7	5.6	5.2	5.0	0.38	1.70	2.25	6	47	85
	33	5.4	5.1	5.1	0.50	2.45	1.41	8	71	84
	59	5.6	5.1	5.1	0.37	1.73	1.52	7	62	84
	85	5.4	5.2	5.2	0.59	1.29	0.80	14	54	86
4	7	5.4	4.3	5.1	0.37	3.06	2.11	8	84	85
	33	5.0	4.7	4.9	1.17	1.91	2.23	46	77	85
	59	5.3	4.8	4.8	0.83	1.71	1.84	41	84	87
	85	5.3	5.0	4.9	0.43	1.64	2.13	29	82	91
5	7	5.8	5.0	5.1	0.23	1.46	1.52	5	60	80
	33	5.3	4.8	4.9	1.35	1.77	2.25	45	67	83
	59	5.4	5.0	4.9	1.27	1.47	2.21	49	67	85
	85	5.4	5.1	4.9	1.17	1.23	2.29	44	67	89

Tableau I. Suite.

Séquence	Profondeur cm	pH(H ₂ O)			Al ³⁺ még/100gr			m		
		V	J	P	V	J	P	V	J	P
6	7	5.5	4.6	5.0	0.50	2.26	2.66	11	78	84
	33	5.2	5.1	5.1	1.00	1.15	1.32	41	77	85
	59	5.4	4.9	5.1	0.88	1.17	1.06	39	74	82
	85	5.2	4.8	5.2	0.81	1.30	1.16	43	78	85
7	7	4.9	4.6	4.9	0.91	1.53	2.32	37	58	81
	33	5.1	5.0	4.9	0.66	1.11	1.48	54	69	88
	59	5.3	5.1	5.0	0.31	0.78	0.87	37	62	90
	85	5.2	5.1	5.2	0.22	0.39	0.77	49	57	83
8	7	5.3	4.8	5.2	0.70	1.36	1.82	18	67	83
	33	5.2	5.1	5.1	1.02	1.42	1.70	30	70	89
	59	5.3	5.0	5.0	0.70	1.29	1.64	22	77	89
	85	5.2	5.2	5.2	0.79	1.03	1.40	33	69	85

Au gradient d'acidité correspond, corrélativement, un gradient inverse de concentration en bases échangeables, comme en témoignent les résultats analytiques reproduits au tableau II.

Tableau II. Evolution des teneurs en calcium, magnésium et potassium échangeables (még/100gr), pour les parcelles vivrières (V), de jachère longue (J) et de pâturage (P) à 7, 33, 59 et 85 cm de profondeur, dans les séquences du Bututsi.

Séquence	Profondeur cm	Ca ⁺⁺			Mg ⁺⁺			K ⁺		
		V	J	P	V	J	P	V	J	P
1	7	2.02	0.25	0.64	0.75	0.02	0.15	0.62	0.12	0.07
	33	0.47	0.13	0.58	0.27	0.01	0.01	0.35	0.05	0.04
	59	0.34	0.10	0.19	0.21	0.01	0.01	0.28	0.02	0.04
	85	0.40	0.10	0.30	0.27	0.01	0.05	0.20	0.02	0.03
2	7	1.80	0.50	0.64	0.76	0.01	0.15	0.76	0.08	0.07
	33	1.60	0.24	0.58	0.51	0.01	0.01	0.21	0.04	0.04
	59	0.80	0.28	0.19	0.35	0.01	0.01	0.13	0.02	0.04
	85	0.78	0.61	0.30	0.33	0.10	0.05	0.06	0.01	0.03
3	7	2.80	1.16	0.09	1.36	0.29	0.02	1.12	0.37	0.12
	33	3.59	0.73	0.06	1.46	0.16	0.01	0.44	0.11	0.03
	59	3.36	0.52	0.01	1.56	0.19	0.01	0.16	0.10	0.02
	85	1.86	0.56	0.01	1.32	0.21	0.01	0.14	0.09	0.01
4	7	3.41	0.11	0.06	0.84	0.08	0.01	0.49	0.11	0.07
	33	0.82	0.11	0.05	0.23	0.08	0.01	0.17	0.11	0.09
	59	0.65	0.01	0.09	0.21	0.02	0.01	0.10	0.02	0.02
	85	0.54	0.01	0.01	0.29	0.01	0.01	0.07	0.02	0.02
5	7	2.14	0.57	0.11	0.95	0.02	0.01	1.09	0.07	0.05
	33	0.67	0.45	0.14	0.29	0.02	0.01	0.42	0.03	0.03
	59	0.64	0.47	0.13	0.25	0.02	0.01	0.32	0.02	0.01
	85	0.78	0.32	0.06	0.35	0.01	0.01	0.23	0.02	0.02
6	7	2.46	0.10	0.11	0.70	0.02	0.01	0.76	0.11	0.13
	33	0.58	0.07	0.01	0.21	0.02	0.01	0.43	0.04	0.04
	59	0.60	0.06	0.03	0.25	0.01	0.01	0.36	0.04	0.03
	85	0.49	0.07	0.01	0.19	0.01	0.01	0.22	0.03	0.01

Tableau II. Suite.

Séquence	Profondeur		Ca ⁺⁺			Mg ⁺⁺			K ⁺		
	cm	V	J	P	V	J	P	V	J	P	
7	7	0.93	0.55	0.25	0.18	0.12	0.01	0.32	0.09	0.07	
	33	0.30	0.20	0.01	0.05	0.04	0.01	0.13	0.03	0.01	
	59	0.30	0.16	0.01	0.02	0.06	0.01	0.10	0.02	0.01	
	85	0.11	0.11	0.01	0.02	0.06	0.01	0.05	0.02	0.03	
8	7	1.91	0.22	0.14	0.64	0.06	0.02	0.58	0.05	0.08	
	33	1.57	0.21	0.05	0.58	0.06	0.04	0.18	0.06	0.03	
	59	1.64	0.11	0.03	0.58	0.02	0.01	0.09	0.02	0.01	
	85	0.96	0.16	0.01	0.44	0.04	0.01	0.06	0.04	0.06	

On remarque la dominance des cations calci-magnésiens sur le complexe adsorbant des sols cultivés en vivres.

REMISE EN CAUSE DE LA THEORIE DE L'EFFET ANTHROPIQUE

Frankart et al. (1974) ont constaté également de fortes différences de teneurs en bases échangeables entre les sols de pâturages et les sols cultivés. Ces auteurs suggèrent que l'action anthropique, par une fumure organique régulière, induirait une resaturation progressive en bases, après qu'un sol sous couvert naturel ait été mis en culture. Cette théorie nous a paru discutable au vu de l'épaisseur impressionnante (au moins 1 m) sur laquelle s'exprimerait le front de resaturation évoqué, et tenant compte également des ressources limitées en fumier dans l'exploitation agro-pastorale traditionnelle, qui peuvent être évaluées à environ 5 à 10 t/an (ISABU, 1986 et 1987).

On a repéré une exploitation où un pâturage avait été "ouvert" depuis exactement deux ans, pour cultiver des vivres, chez le fermier "Buhwibiri", de la colline Kiryama. Le complexe adsorbant du sol de cette parcelle vivrière récente et celui du sol du parcours limitrophe, ont été caractérisés pour établir un bilan comparatif en éléments biogènes. Les résultats analytiques sont reproduits au tableau III.

Tableau III. Cations échangeables du sol d'une parcelle vivrière ouverte depuis 2 ans, et du sol de pâturage limitrophe, dans la ferme BUHWIBIRI.

Parcelle	Profondeur cm	Cations échangeables (még/100 gr.)							m
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺		
Vivres	0-20	1.29	0.56	1.07	0.03	0.83	0.24	21	
	20-40	0.53	0.23	0.42	0.02	1.75	0.11	57	
	40-60	1.12	0.28	0.18	0.03	0.86	0.04	34	
	60-80	0.59	0.23	0.17	0.03	0.73	0.10	39	
Pâturage	0-20	0.37	0.09	0.09	0.01	1.63	0.14	70	
	20-40	0.11	0.03	0.05	0.01	1.56	0.07	85	
	40-60	0.06	0.01	0.03	0.01	1.80	0.06	91	
	60-80	0.06	0.03	0.05	0.02	1.76	0.12	86	

En posant la densité apparente égale à 1,0 et en se rapportant à une épaisseur de 80 cm, les différences de teneurs en calcium, magnésium et potassium s'évaluent respectivement comme suit, pour les deux sols considérés: 1172 kg/ha de Ca, 274 kg/ha de Mg, 1267 kg/ha de K. D'autre part, si l'on se rapporte à une analyse de fumier d'étable échantillonné à la station ISABU de Gisozi, reproduite au tableau IV, on observe que chaque tonne contiendrait environ 2 kg de calcium, 1 kg de magnésium, et 3,5 kg de potassium.

Tableau IV. Résultats analytiques (sur matière fraîche) d'un échantillon de fumier d'étable de GISOZI dosant 33% de matière sèche.
Sources: Laboratoire de chimie agricole de l'ISABU.

pH H ₂ O 1/5	conductivité 1/5 (mmho/cm)	C%	N%	C/N	Analyse minérale (ppm)		
					CaO	MgO	K ₂ O
7.5	1.022	3.33	0.67	5.0	2622	1990	4076

Si aucune perte par lessivage n'a été encourue durant les deux premières années, le fermier "Buhwibiri" aurait dû appliquer plus de 580 t/ha de fumier pour la resaturation en calcium de sa nouvelle parcelle vivrière, ou plus de 270 t/ha si l'on se rapporte à la resaturation en magnésium, ou plus de 360 t/ha si l'on se rapporte à la resaturation en potassium. Il est parfaitement irréaliste de penser que de telles quantités de fumier soient disponibles en milieu rural. Les différences de concentration en bases observées dans le tableau III ne peuvent donc pas être imputées à la fumure organique. De plus, aucune fertilisation minérale n'est pratiquée par les fermiers du Bututsi. D'autres observations expérimentales remettent aussi en cause l'intervention unique de l'action anthropique pour expliquer les différences de concentrations en bases dans les pâturages et les terres cultivées. On citera la dominance des bivalents sur le complexe d'échange des sols cultivés, alors que le fumier a une concentration élevée en potasse. On évoquera aussi que le caractère légèrement basique du fumier ne paraît pas suffisant pour corriger l'acidité des sols de pâturage de manière aussi spectaculaire.

Nous concluons que des différences significatives d'acidité préexistaient dans les sols des paysages agro-pastoraux avant la sédentarisation de l'agriculture.

ORIGINE ALLOCHTONE DES SOLS

L'individualisation d'affleurements latéritiques et quartzitiques au sommet des paysages agro-pastoraux, l'identification d'horizons sombres de profondeur dans les sols situés en aval, et la superposition occasionnelle de matériaux parentaux d'origine lithologique différente, sont autant d'observations géomorphologiques et pédologiques qui plaident en faveur d'une origine allochtone des sols. Plusieurs phases d'aplanissement par transport en

masse (solifluxion, colluvionement, etc.) ont pu s'être déroulées, suite à l'alternance de paléo-climats secs et humides. Ces "pulsations" climatiques anciennes sont admises à l'échelle des temps géologiques. Au quaternaire, dans les régions nordiques se sont succédées des périodes glaciaires (froides) et des périodes interglaciaires (plus chaudes). Ces dernières correspondraient à des périodes plus humides dans les régions tropicales (BONNEFILLE, 1987a). Des sondages palynologiques effectués au Burundi (ROCHE et al., 1987), dans les tourbières de Kashiru (Ijenda) et Kuruyange (Gisozi), confirment l'existence de pulsations climatiques assez récentes (les derniers 30 000 ans). Les variations climatiques se traduisent par des régressions des forêts durant des périodes plus froides et surtout plus sèches (périodes glaciaires) et des expansions forestières durant les périodes plus humides (interglaciaires). Au Burundi, BONNEFILLE (1987b) distingue trois phases principales de l'évolution forestière: avant 30 000 ans B.P. une prédominance d'une forêt de conifères et de la zone des bruyères, puis une régression presque totale au profit de graminées afro-alpines, et enfin la forêt ombrophile actuelle qui date des dix derniers millénaires. La régression forestière la plus récemment détectée, vers 4 500 ans B.P., n'est pas attribuée avec certitude à une déforestation anthropique, mais correspondrait à une phase plus aride du climat. Quoiqu'il en soit, l'existence de phases d'aplanissement des paysages sous alternance de paléo-climats secs et humides ne paraît guère faire de doutes. On peut dès lors suggérer qu'un paysage forestier initial ait été partiellement aplani en plusieurs phases pour conduire à la configuration actuelle du paysage. Une illustration en est fournie à la figure 2. Il va de soit que la nature et l'intensité des phases d'aplanissement ont pu varier avec les conditions topographiques, pédo-géologiques, hydrologiques, ainsi qu'avec l'intensité et la nature du développement des formations végétales de couverture, ce qui explique la diversité des paysages actuels dans les diverses régions d'altitude du Burundi.

PROBABILITE D'UNE PALEO-ACIDIFICATION FORESTIERE DES SOLS

L'acidification des sols est un phénomène naturel, découlant notamment des réactions de respiration microbienne et racinaire et de la nitrification de l'azote (libération de 2 protons par molécule d'ammonium oxydée en nitrite). Lorsque le pH du sol s'abaisse au-dessous de 5.5, de l'aluminium cationique sature progressivement le complexe adsorbant aux détriments des bases, emportées par lessivage. Une forte acidité des sols est aujourd'hui mesurée dans les régions humides du globe, sous végétation forestière ou post-forestière (savanes), dans des matériaux pédogénétiquement évolués.

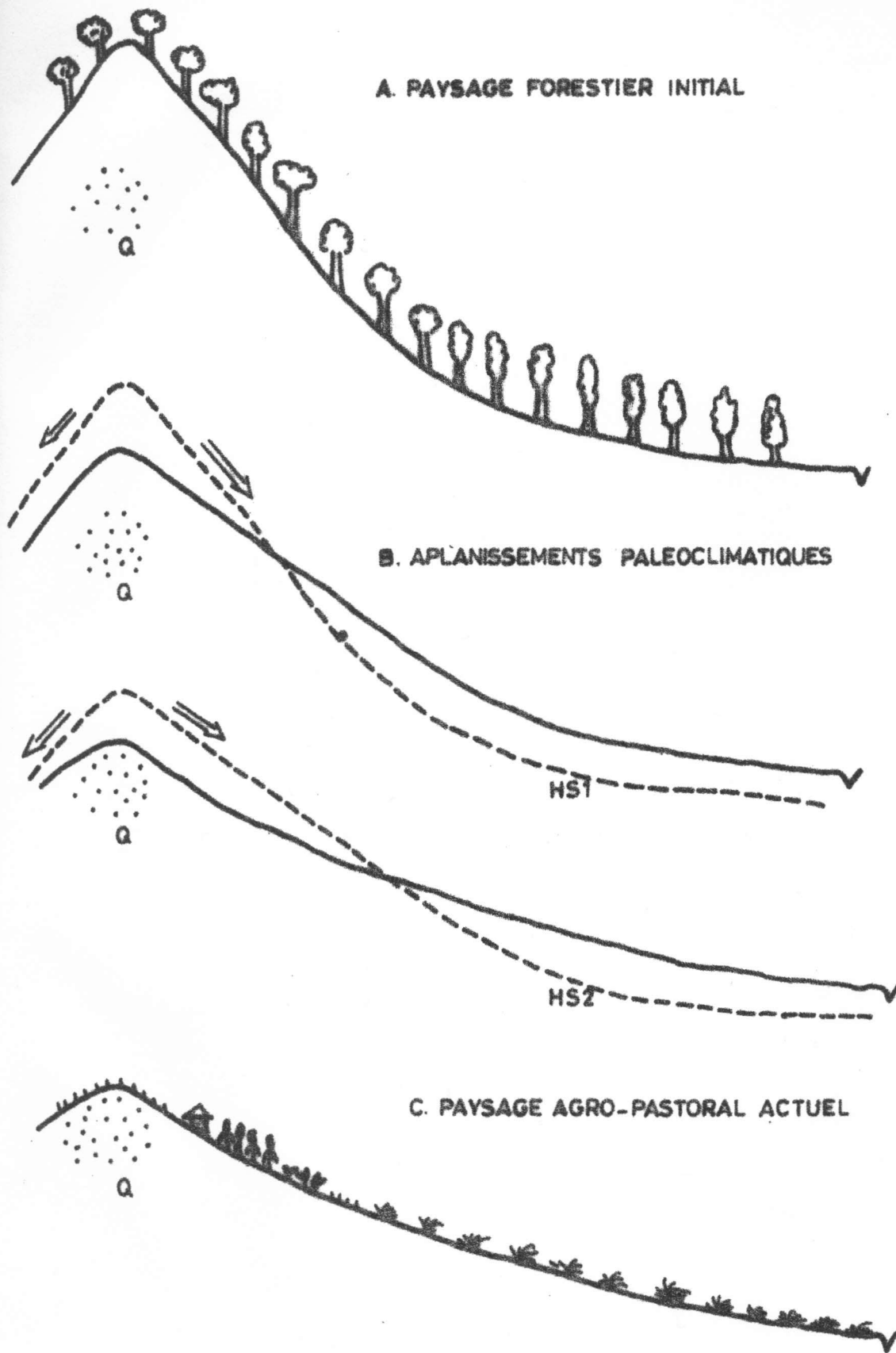


Figure 2 : Illustration schématique de l'évolution paléo-géomorphologique des paysages du Bututsi
Q = quartzite; HS1, HS2 = horizons sombres

Plusieurs profils pédologiques prélevés au Burundi par Escobedo (1982), dans les forêts naturelles du Mugamba-Nord ou de Bururi, sont fortement acides et développent des concentrations très élevées en aluminium, sous des conditions topographiques fort diverses et dans plusieurs types de roches mères. Au Zaïre, d'énormes superficies de terres acides ont été cartographiées sous forêt et savanes équatoriales ou tropicales humides (Van Wambeke et Liben, 1957; Gilson et Liben, 1960; Frankart, 1960; Pécrot et Léonard, 1960; Jongen et Jamagne, 1966). Sur le continent américain, la forêt amazonienne et la savane tropicale "Cerrado" sont caractérisées également par des terres très acides (Sanchez et al., 1983; Lopez et Cox, 1977).

L'activité respiratoire et nitrificatrice est assez intense sous forêt, du fait des biomasses importantes engagées de manière permanente dans les cycles du carbone et de l'azote. L'acidification des sols sous végétation forestière dense peut donc être particulièrement forte et atteindre des horizons de profondeur. On peut dès lors admettre qu'une acidification prononcée des sols se soit produite durant les diverses phases climatiques humides, correspondant au développements maxima des formations forestières. Lors des phases d'aplanissement les matériaux acides superficiels auraient été érodés du sommet des paysages, puis déposés en aval. En amont, par contre, des matériaux profonds peu ou non acides, auraient été mis à nu par l'érosion.

Ce scénario paléo-pédologique explique dans une large mesure les diverses observations effectuées dans les topo-bioséquences du Bututsi. Il suppose que la forte acidité mesurée sous les pâturages, et exprimée sur une épaisseur importante, résulte, en grande partie, d'une paléo-acidification des sols. Les processus d'acidification du sol se poursuivent actuellement, mais seraient contrebalancés sous cultures par la fumure organique (apports extérieurs d'éléments biogènes).

EVOLUTION MINERALOGIQUE DES ARGILES

C'est dans une autre topo-bioséquence de sols ferrallitiques, prélevée à la station ISABU de Gisozi, dans une région agro-pastorale voisine du Bututsi, qu'on a procédé à la caractérisation minéralogique des argiles. La séquence est constituée d'une dizaine de sols d'acidité croissante, également identifiés comme "Typic Haplohumox" et "Typic Sombrihumox" et développés dans un matériau parental comparable à celui des sols des topo-bioséquences du Bututsi. Tous les sols de la séquence sont cultivés depuis des périodes très variables, et utilisés pour divers essais agronomiques. Du point de vue topographique, ils sont localisés sur le sommet, les versants et les replats d'un colline sub-tabulaire.

Des échantillons, prélevés à 7, 59 et 98 cm dans les dix profils de la séquence, ont été soumis à la diffraction X sur argiles orientées.

On a également dosé les teneurs en aluminium extractible à l'oxalate acide (Mc Keague et Day, 1966), afin d'établir la présence éventuelle de formes amorphes de l'aluminium. Les espèces minéralogiques identifiées sur les diffractogrammes X et les teneurs en aluminium amorphe extrait à l'oxalate sont indiquées dans le tableau V, en précisant le taux de saturation aluminique effective de chaque échantillon (indice "m").

Tableau V. Espèces minéralogiques présentes dans la fraction argileuse des sols de la séquence GISOZ1, classées par ordre d'intensité décroissante des pics de diffraction X sur argile orientée; et teneurs en aluminium amorphe (Al%).
 "K"= kaolinite; "Gi"= gibbsite; "Ch*" = chlorite thermiquement instable; "Go"= goethite; "He"= hématite; "Il"= illite;
 "Int"= interstratifié non gonflant; les parenthèses signalent que l'espèce n'est identifiée que sous forme de traces.

Profil	Profondeur	Al%	Indice "m"	Composition
B61	7 cm	0.73	2	K, Gi, Ch*, Go, He.
	59 cm	0.64	12	K, Gi, Ch*, (Il).
	98 cm	0.85	9	K, Gi, Ch*, (Go,He).
B62	7 cm	0.99	6	K, Gi, He, (Ch*).
	59 cm	1.46	16	K, Gi, (Ch*).
	98 cm	1.09	10	K, Gi, Ch*.
B63	7 cm	1.24	25	K, Gi, (Ch*).
	59 cm	1.53	7	K, Gi, (Ch*).
	98 cm	0.75	4	K, Gi, Ch*.
B64	7 cm	1.08	18	K, Gi, (Ch*).
	59 cm	1.35	16	K, Gi, Ch*, Int, Go.
	98 cm	1.01	14	K, Gi, Ch*.
B65	7 cm	1.37	59	K, Gi, Ch*, He.
	59 cm	1.59	22	K, Gi, Ch*.
	98 cm	1.39	16	K, Gi, Ch*, He, (Go).
B66	7 cm	1.30	49	K, Gi, Ch*, (He,Go).
	59 cm	2.24	21	K, Gi, Ch*.
	98 cm	1.25	21	K, Gi, He, (Ch*,Go).
B67	7 cm	0.79	70	K, Gi, (Ch*,He,Go).
	59 cm	1.56	63	K, Gi, Int, Ch*, (He).
	98 cm	1.39	52	K, Gi, Ch*, (Int,Go,He).
B68	7 cm	0.88	75	K, Gi, Ch*, He, (Go).
	59 cm	1.68	68	K, Gi, Ch*, (He).
	98 cm	0.84	79	K, Gi, Ch*, He, (Go).
B69	7 cm	1.35	89	K, Gi, Ch*, (Go).
	59 cm	1.63	86	K, Gi, (Ch*).
	98 cm	1.33	77	K, Gi, Ch*, (He,Go).
B610	7 cm	1.08	86	K, Gi, Ch*, Go, He.
	59 cm	1.50	72	K, Gi, He, (Ch*).
	98 cm	0.75	78	K, Gi, (Go,He).

La kaolinite et la gibbsite sont les deux espèces minéralogiques dominantes. La troisième espèce, par ordre d'importance, est une chlorite thermiquement instable, c'est-à-dire un minéral de 14 A, non gonflant, qui est détruit à une température inférieure à 550°C. Ce minéral est présent en faible quantité (pics peu intenses) ou en traces, tant en surface qu'en profondeur, de manière quasi-systématique dans la séquence considérée.

La figure 3 reproduit des extraits de 3 diagrammes X de routine, où l'on peut observer les 3 pics représentatifs de ces espèces dominantes.

La goëthite et l'hématite ne sont pas systématiquement détectées; leur pics de diffraction sont peu intenses ou à peine esquissés. On note aussi la présence très occasionnelle (sols n° BG4 et BG7) d'un interstratifié non gonflant, de type illite-vermiculite. Un seul échantillon présente des traces d'illite (sol n° BG1, 59 cm). Des teneurs significatives en aluminium amorphe sont mesurées, de 0.6 à 2.2%. Ces formes d'aluminium peuvent être assimilées à des polymères hydroxy-alumino-humiques et sont présentes dans toute la séquence sur toute l'épaisseur des sols. Elles constituent la source actuellement la plus soluble d'aluminium.

Nous pensons que c'est l'aluminium amorphe qui a alimenté la saturation progressive du complexe adsorbant en cet élément, à mesure que l'acidification progressait. L'interaction d'hydroxy-polymères aluminiques avec des composés humiques les auraient préservés d'une cristallisation en gibbsite.

Les traces d'illite, d'interstratifié illite-vermiculite et la présence d'une chlorite thermiquement instable, seraient les témoins d'une séquence classique d'agradation:

(1) (2)

Illite ---> Vermiculite ---> Chlorite aluminique

La réaction (1) est la vermiculitisation des micas, contrôlée par le K level (concentration du potassium en solution), tandis que la réaction (2) suppose la précipitation d'espèces hydroxy-aluminiques entre les feuillets de la vermiculite. Cette deuxième réaction impliquerait l'individualisation d'aluminium avant le stade d'altération actuel, sans doute par pression protolytique sur les minéraux primaires de la roche mère, voire sur certains minéraux secondaires. Ces réactions seraient en accord avec la théorie de la paléo-acidification des sols, suggérée précédemment.

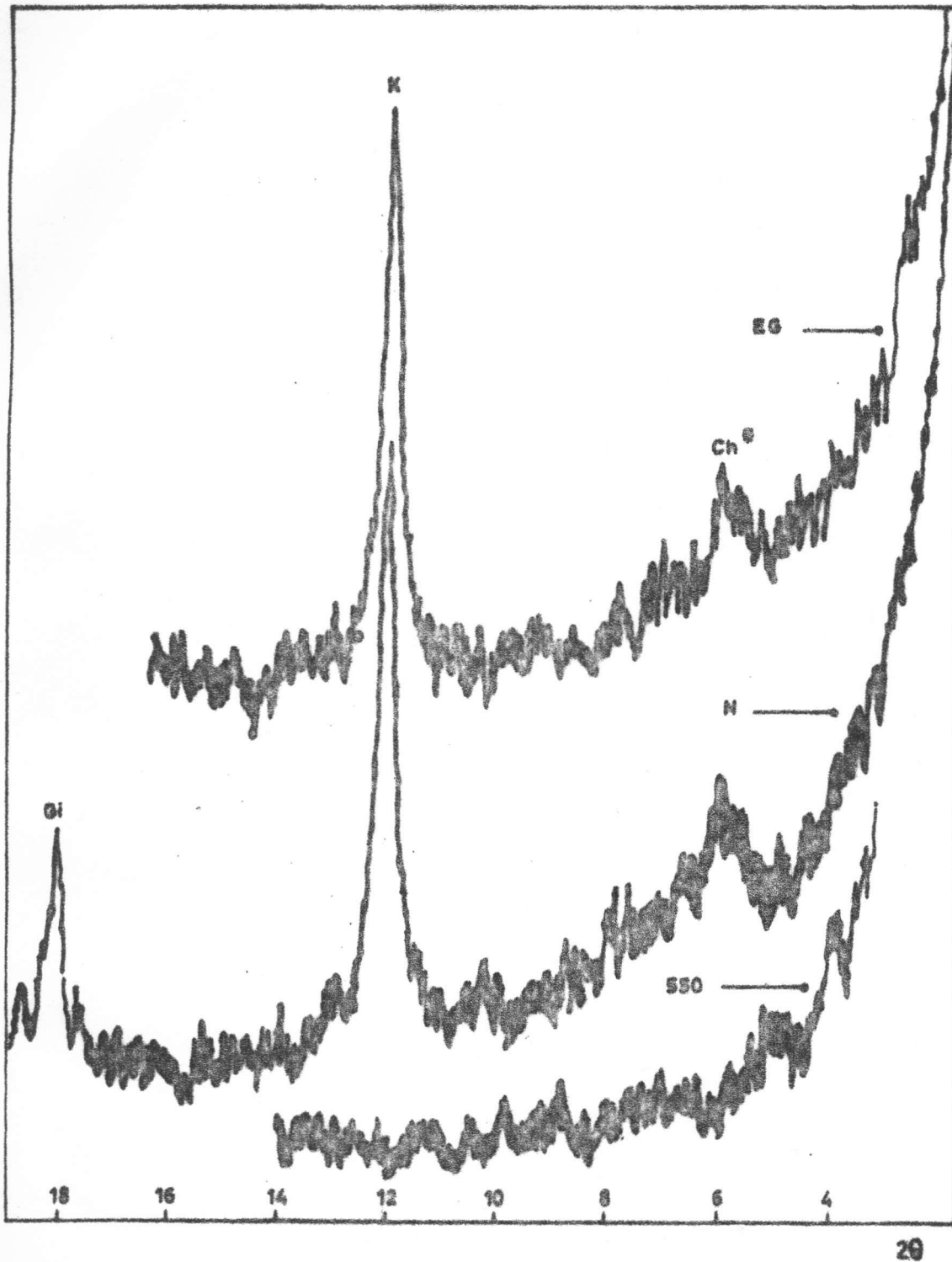


Figure 3 : Diagrammes de diffraction de rayons X sur argile orientée, après traitements "normal" (N), à l'éthylène glycol (EG) et à 550°C (550). Profil EG 6, profondeur 59 cm.

K = kaolinite, Ch^o = chlorite thermiquement instable, Gi = gibbsite

CONCLUSIONS

Les sols ferrallitiques des régions agro-pastorales d'altitude du Burundi ont subi une pédogenèse acide, caractérisée par l'individualisation d'hydroxy-polymères aluminiques à partir de minéraux primaires, au cours de phases d'altération anciennes. Ces espèces aluminiques ont précipité partiellement entre les feuillets d'une vermiculite pour former une chlorite thermiquement instable. Une autre fraction de l'aluminium amorphe a probablement réagi avec des composés humiques en formant des macro-molécules complexes. La dernière fraction de l'aluminium a cristallisé en gibbsite ou co-précipité avec la silice pour former de la kaolinite.

Les sols ferrallitiques les plus acides sont actuellement identifiés dans les pâturages naturels qui se localisent en aval des terres cultivées. Ils sont fortement saturés par l'aluminium échangeable sur une grande épaisseur, et ne disposent, corrélativement, que d'une très faible teneur en bases. Les contrastes de fertilité qu'ils présentent avec les sols cultivés en amont, seraient hérités d'une paléo-acidification sous d'anciens couverts forestiers. Le paysage aurait été remodelé suite à plusieurs phases d'aplanissement résultant de l'alternance de paléo-climats secs et humides, correspondant, au quaternaire, aux périodes glaciaires et interglaciaires.

REMERCIEMENTS

Les résultats présentés ont été acquis dans le cadre de l'étude de la toxicité alumino-manganique des sols d'altitude du Burundi, co-financée par la Commission des Communautés Européennes (contrat TSD-A-411-RU) et la Coopération Bilatérale Belge.

L'auteur remercie d'autre part le professeur R. Frankart (UCL, Faculté des Sciences Agronomiques, Louvain-la-Neuve) pour les analyses minéralogiques effectuées, ainsi que monsieur J. Gourdin (ISABU, laboratoire de Chimie Agricole) qui a dirigé les travaux d'analyses physico-chimiques. Il remercie également MM. I. Musoni (ISABU, Fertilité des Sols) et P. Pozy (ISABU, Zootechnie) pour leur collaboration très active lors des prélèvements d'échantillons de sols.

Enfin, des remerciements sont également adressés au professeur L. TACK, de la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi, pour ses conseils scientifiques et sa documentation bibliographique relative aux études palynologiques.

LITTERATURE CITEE

- BONNEFILLE, R.; 1987a. Evolution des milieux tropicaux africains depuis le début du cenozoïque. Mém. Trav. E.P.H.E., Inst. Montpellier, 17: 101-110.
- BONNEFILLE, R.; 1987b. Evolution forestière et climatique au Burundi durant les quarante derniers milliers d'années. C.R. Acad. Sci. Paris, t.305, série II: 1021-1026.
- ESCOBEDO, J.; 1982. Les sols du versant ouest de la crête Zaïre-Nil au Burundi. Cartes n° 8a/Cell.Cart0/82 et n° 8b/Cell.Cart0/82. Annexe 1, profils 17, 18, 23, 24, 31, 92, 93, 94: 199 p.
- FRANKART, R.; 1960. Carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Rwanda-Urundi. 14.UELE. Notice explicative de la carte des sols. Publications INEAC; Bruxelles. 128 p.
- 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.
- GILSON, P. et L.LIBEN; 1960. Carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Rwanda-Urundi. 15.KASAI. Notice explicative de la carte des sols et de la végétation. Publications INEAC; Bruxelles. 76 p.
- ISABU, 1986. Rapport annuel (Tome 2). Division de Zootechnie, programme ZD 8501: 124-129.
- ISABU, 1987. Rapport annuel (Tome 4). Division de Zootechnie, programme ZD 8501: 46-47.
- JONGEN, P. et M.JAMAGNE; 1966. Carte des sols et de la végétation du Congo, du Rwanda et du Burundi. 20.Région TSHUAPA-EQUATEUR. Notice explicative de la carte des sols. Publications INEAC; Bruxelles. 82 p.
- LOPEZ, A.S. and F.R.COX; 1977. A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 742-747.
- Mc KEAGUE, J.A. and J.H. DAY; 1966. Dithionite- and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. Can. J. Soil Sci. 46: 13-22.
- PECROT, A. et A.LEONARD; 1960. Carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Rwanda-Urundi. 16.DORSALE DU KIVU. Notice explicative de la carte des sols et de la végétation. Publications INEAC; Bruxelles. 124 p.
- ROCHE, E., G.BIKWEMU et C.NTAGANDA; 1987. Evolution du paléoenvironnement au Rwanda et au Burundi au Quaternaire récent. Analyse des phénomènes morphotectoniques et des données sédimentologiques et palynologiques. Xe symp. de l'APLF, Bordeaux (28 sept.-2 oct.): 26 p.
- SANCHEZ, P.A., J.H.VILLACHICA and D.E.BANDY; 1983. Soil fertility dynamics after clearing a tropical rainforest in Peru. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 1171-1178.
- SOIL SURVEY STAFF; 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agric. Handbook No.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.
- VAN WAMBEKE, A. et L.LIBEN; 1957. Carte des sols et de la végétation du Congo Belge et du Rwanda-Urundi. 6.YANGAMBI. Planchette 4.YAMBAW. Notice explicative de la carte des sols et de la végétation. Publications INEAC; Bruxelles. 47 p.